

AUGUSTO MARCOS DA SILVA HOFMANN

**EXPERIMENTOS, MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UMA
OPERAÇÃO CONTÍNUA DE SECAGEM E RESFRIAMENTO DE SOJA (*Glycine
max*) EXTRUSADA**

CURITIBA

2012

AUGUSTO MARCOS DA SILVA HOFMANN

**EXPERIMENTOS, MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE DE UMA
OPERAÇÃO CONTÍNUA DE SECAGEM E RESFRIAMENTO DE SOJA (*Glycine
max*) EXTRUSADA**

Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Mestre.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Alimentos – PPGEAL – Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Everton Fernando Zanoelo

CURITIBA

2012

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Partes principais do grão de soja (PERKINS, 1995).	4
Figura 2.2. Isoterma de equilíbrio para a soja a 40 °C. Linha pontilhada: Equação (2.2); linha tracejada: Equação (2.3); linha sólida: Equação (2.4); linha com traços longos: Equação (2.5).	13
Figura 3.1. Desenho esquemático do secador-resfriador estudado. E ₁ , E ₂ e E ₃ são os exaustores envolvidos na operação.	19
Figura 3.2. Esquema do volume de controle adotado no modelo	20
Figura 4.1. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leite soja alimentado a 100 °C em um secador batelada operando a 30 °C.	30
Figura 4.2. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leite de soja com M _{in} igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 30°C.	30
Figura 4.3. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leite soja alimentado a 100 °C em um secador batelada operando a 40 °C.	31
Figura 4.4. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leite de soja extrusada com Min igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 40 °C.	31
Figura 4.5. Resultados experimentais (símbolos) e calculados (linhas) de umidade de soja extrusada alimentada a 100 °C em um secador batelada operando a 30 °C (quadrados) e 50 °C (losangos e linha sólida).....	32
Figura 4.6. Resultados experimentais (símbolos) e calculados (linhas) de temperatura de soja extrusada com umidade inicial de 0,16 (b.s.) em um secador batelada operando a 30 °C (quadrados) e 50 °C (losangos e linha sólida).....	32

Figura 4.7. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leito soja alimentado a 95 °C em um secador batelada operando a 30 °C.	33
Figura 4.8. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leito de soja extrusada com Min igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 30 °C.	33
Figura 4.9. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leito soja alimentado a 95 °C em um secador batelada operando a 40 °C.	34
Figura 4.10. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leito de soja extrusada com umidade inicial igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 40 °C.....	34
Figura 4.11. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leito soja alimentado a 95 °C em um secador batelada operando a 50 °C.	35
Figura 4.12. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leito de soja extrusada com umidade inicial igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 50 °C.....	35
Figura 4.13. Efeito da temperatura sobre o coeficiente efetivo de transporte de massa. Símbolos: resultados ajustados a partir de ensaios de secagem em secador batelada; linha sólida: Equação (4.1).....	36
Figura 4.14. Efeito da temperatura sobre o coeficiente efetivo de transporte de calor. Símbolos: resultados ajustados a partir de ensaios de secagem em secador batelada; linha sólida: Equação (4.2).	37
Figura 4.15. Comportamento dinâmico da umidade de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: ar de secagem e resfriamento a uma temperatura e umidade absoluta médias de 53 °C	

e $0,0685 \text{ kg kg}^{-1}$, respectivamente. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8)..... 38

Figura 4.16. Comportamento dinâmico da temperatura de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: ar de secagem e resfriamento a uma temperatura e umidade absoluta médias de 53°C e $0,0685 \text{ kg kg}^{-1}$, respectivamente. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8)..... 40

Figura 4.17. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade (losangos e linha sólida) e temperatura (quadrados e linha tracejada) do leito de soja extrusada em um secador-resfriador batelada operando a 40°C 41

Figura 4.18. Comportamento dinâmico da umidade de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: temperatura e umidade absoluta médias do ar de secagem estimadas a cada 920 s com base em medidas experimentais reportadas na Tabela 4.1 e Equações (4.5) e (4.6). Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8). 45

Figura 4.19. Comportamento dinâmico da temperatura de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: temperatura e umidade absoluta médias do ar de secagem estimadas a cada 920 s com base em medidas experimentais reportadas na Tabela 4.1 e Equações (4.5) e (4.6). Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8). 46

Figura 4.20. Perturbações randômicas na umidade de alimentação do leito de soja extrusada no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações. 47

Figura 4.21. Perturbações randômicas na temperatura de alimentação do leito de soja extrusada no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações.....	47
Figura 4.22. Perturbações randômicas na temperatura média do ar no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações.....	48
Figura 4.23. Perturbações randômicas na umidade absoluta média do ar no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações.....	48
Figura 4.24. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações em M_i reportadas na Figura 4.20.	49
Figura 4.25. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.24. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.	49
Figura 4.26. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.24. Linha com traços longos: <i>set-point</i>	50
Figura 4.27. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações em T_{si} reportadas na Figura 4.21.	50
Figura 4.28. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.27. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.	51

Figura 4.29. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.27. Linha com traços longos: <i>set-point</i> .	51
Figura 4.30. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações em T_g reportadas na Figura 4.22.	52
Figura 4.31. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.30. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.	52
Figura 4.32. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.30. Linha com traços longos: <i>set-point</i> .	53
Figura 4.33. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações na umidade absoluta do ar reportadas na Figura 4.23.	53
Figura 4.34. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.33. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.	54
Figura 4.35. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.33. Linha com traços longos: <i>set-point</i> .	54
Figura 4.36. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador com passo 30 s e perturbações simultâneas em M_i (0,142 a 0,156 b.s.), T_{si} (103,2 a 109,8 °C), T_g (52,6 a 53,4 °C) e U (0,0663 a 0,0703 kg kg ⁻¹). ...	56

Figura 4.37. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.36. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.

..... 56

Figura 4.38. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.36. Linha com traços longos: *set-point*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Composição do grão de soja em base seca (Liu, 1997).....	4
Tabela 2.2. Produção mundial de soja em milhões de toneladas (USDA, 2011). ...	6
Tabela 2.3. Exportação mundial de soja em milhões de toneladas (USDA, 2011). 6	
Tabela 2.4. Densidade aparente da soja seca.	11
Tabela 2.5. Calor específico da soja seca.....	14
Tabela 4.1. Propriedades do gás de secagem nos ensaios que conduziram ao comportamento dinâmico observado nas Figuras 4.18 e 4.19	44

LISTA DE SÍMBOLOS - NOTAÇÃO

a_p	área superficial das partículas, m^2 ;
Cp_l	calor específico da água líquida, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
Cp_{ss}	calor específico do sólido seco, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
Cp_v	calor específico do vapor de secagem, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
E_i	i-ésimo exaustor na Figura 3.1;
f	função objetivo definida pela Equação (4.4); $kg\ kg^{-1}\ ^\circ C$;
f_M	função objetivo definida pela Equação (3.9); $kg\ kg^{-1}$;
f_T	função objetivo definida pela Equação (3.10); $^\circ C$;
h	coeficiente de transferência de calor, $W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$;
h_m	coeficiente efetivo de transporte de calor, $W\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
ISE	função objetivo definida pela Equação (3.11); $^\circ C^2$;
JI	número de medidas de umidade ou temperatura nos experimentos de laboratório em cada temperatura investigada, adimensional;
JK	número de medidas de umidade ou temperatura na descarga do secador em regime transiente nas Figuras 4.15 e 4.16, adimensional;
k	coeficiente de transporte de massa, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$;
k_m	coeficiente efetivo de transporte de massa, s^{-1} ;
k'_m	coeficiente efetivo de transporte de massa na equação de Page, s^{-1} ;
M_e	umidade de equilíbrio da soja em base seca, $kg\ kg^{-1}$;
M_i	umidade de alimentação da soja em base seca, $kg\ kg^{-1}$;
M_{in}	umidade inicial da soja em base seca, $kg\ kg^{-1}$;
M_o	umidade de descarga da soja em base seca, $kg\ kg^{-1}$;
M	umidade da soja em base seca, $kg\ kg^{-1}$;
m_{ss}	massa de sólido seco, kg ;
n	parâmetro da equação de Page (Equação 2.6), adimensional;
p_{sat}	pressão de saturação na temperatura média do gás, mmHg;
R^2	coeficiente de determinação, adimensional;
T_{si}	temperatura de alimentação da soja, $^\circ C$;
T_{sin}	temperatura inicial da soja, $^\circ C$;

T_{so}	temperatura de descarga da soja, °C;
T_g	temperatura do gás de secagem, °C;
T_s	temperatura do sólido, °C;
T_{s_set}	set-point para temperatura do sólido, °C;
t	tempo, s ⁻¹ ;
U	umidade absoluta do ar; kg kg ⁻¹ ;
UR	umidade relativa do ar, kg kg ⁻¹ ;
u_c	velocidade da esteira, m s ⁻¹ ;
V_s	volume de sólido seco no leito; m ³ ;
x	posição axial na esteira, m;

SÍMBOLOS GREGOS

ε	porosidade;
ρ	densidade da soja, kg m^{-3} ;
ρ_b	densidade bulk, kg m^{-3} ;
ρ_{ss}	densidade do sólido seco, kg m^{-3} .

RESUMO

A secagem e resfriamento simultâneos em esteiras móveis é uma operação preliminar tipicamente aplicada em indústrias de processamento de soja com o objetivo de reduzir a umidade e temperatura do leito alimentado no extrator de óleo e proteína. Embora estes parâmetros sejam importantes para propósitos de segurança e otimização de extração, esquemas para o controle automático destas variáveis são extremamente limitados ou inexistentes na literatura. Neste sentido, a presente investigação sugere a utilização de um controlador PID para manipular a velocidade da esteira a fim de manter a temperatura dos flocos de soja expandidos na saída do secador-resfriador em 61,0 °C sem exceder o intervalo de 0,099 a 0,123 (base seca) de umidade de descarga do produto. Respostas das variáveis investigadas em malha aberta e fechada frente a perturbações arbitrárias na umidade (0,142-0,156 b.s.), e temperatura (103,2-109,8 °C) de alimentação do sólido, assim como na temperatura (52,6-53,4 °C) e umidade média do ar (0,0663-0,0703 kg kg⁻¹) confirmaram a validade da estratégia de controle proposta. Um modelo dinâmico representado por um sistema de duas equações diferenciais parciais obtido por um balanço de energia e de massa para o soluto no leito de sólidos foi empregado como secador-resfriador virtual. A consistência do modelo foi verificada por comparação entre resultados experimentais e calculados de umidade e temperatura de soja extrusada na descarga de um secador-resfriador contínuo de grande porte operando em típicas condições industriais. Os coeficientes efetivos de transporte de massa e calor requeridos para solução numérica do modelo dinâmico pelo método das diferenças finitas foram ajustados a um conjunto de dados cinéticos de secagem e resfriamento obtidos em um secador-resfriador batelada de laboratório a 30, 40 e 50 °C. A técnica ISE e o método simplex de otimização foram aplicados para determinar os parâmetros do controlador requeridos para um controle estável do processo.

Palavras-Chave: Secagem, resfriamento, soja extrusada, experimentos, modelagem, simulação.

ABSTRACT

Simultaneous drying and cooling in conveyor-belts is a preliminary operation typically applied in the soybean processing industry to reduce the moisture content and temperature of the full-fat flakes fed to the oil and protein extractor. Although these parameters are important to have a safe and optimal process of extraction, limited or even inexistent schemes for their control are available. To deal with this drawback, the current investigation suggests the use of a PID controller to manipulate the speed of the conveyor-belt in order to keep the temperature of the flakes in the discharge of the dryer-cooler close to 61.0 °C without exceeding the acceptable outlet moisture content range from 0.099 to 0.123 in dry basis. Closed-loop responses for the controlled variables when considering simultaneous arbitrary disturbances on inlet moisture content (0.142-0.156 d.b.), inlet temperature of the solid (103.2-109.8 °C), average air temperature (52.6-53.4 °C) and absolute humidity (0.0663-0.0703 kg kg⁻¹) confirmed the reliability of the current strategy of control. A dynamic model represented by a system of two partial differential equations obtained by an energy and mass balance for the solute in the bed was used as a virtual conveyor-belt dryer-cooler. The consistency of this model was checked by a comparison between experimental and calculated results of moisture content and temperature at the exit of a size-scale dryer-cooler of soybean flakes at typical industrial operating conditions. The effective coefficients of mass and heat transfer required to numerically solve the model by using the finite difference method were tuned on a set of kinetic drying and cooling curves obtained in a batch dryer-cooler. The ISE technique and simplex method of optimization were used to tune the set of PID parameters in which process control is stable.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ii
SÍMBOLOS GREGOS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 SOJA – CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA E PRODUÇÃO	3
2.2 PROCESSAMENTO DE SOJA.....	6
2.1.1 Operações envolvidas na Unidade de Preparo dos Grãos	7
2.1.2 Extração de Óleo com Solvente	10
2.3 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E DE TRANSPORTE DA SOJA.....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 EXPERIMENTOS	16
3.1.1 Matéria prima	16
3.1.2 Ensaios Laboratoriais.....	17
3.1.3 Ensaios Industriais	18
3.2 EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO E SOLUÇÃO DOS MODELOS	20
3.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é uma leguminosa herbácea com alto teor protéico e de óleo. Devido as suas inúmeras variedades apresenta fácil adaptação aos diversos tipos de clima e fotoperíodo, características que a colocam entre as oleaginosas de maior interesse comercial.

Aproximadamente 80 % da produção e 90 % da comercialização mundial de soja são concentradas nos Estados Unidos, Brasil e Argentina. O Brasil é atualmente responsável por uma safra de 69 milhões de toneladas de produto (CONAB, 2011), sendo o grão cultivado em praticamente todas as regiões do país (CONAB, 2011; CUSTÓDIO, 2003). Nos últimos cinco anos o volume produzido corresponde a aproximadamente 26,5 % da produção global (USDA, 2011) e deste total somente a fração de grão de soja destinada a exportação na safra 2009/10 era estimada em US\$ 11,0 bilhões.

Embora os números nacionais relativos ao cultivo e comércio de soja sejam significativos, é a industrialização deste agroproduto, com foco na expansão e otimização das operações industriais, que merece particular atenção. Este fato decorre da variedade de derivados com alto valor agregado que podem ser obtidos por processamento do material *in natura* (PARAÍSO, 2001; CUSTÓDIO, 2003).

O óleo com propósitos alimentícios ou energéticos, o farelo de soja empregado como aditivo de alimentos industrializados (RODRIGUES, 2003), e o resíduo sólido oriundo do estágio de extração de óleo destacam-se como produtos primários da manufatura. A lecitina de soja, gorduras emulsionadas, o óleo combustível, o leite de soja, o queijo de soja, o molho de soja, o farelo concentrado de soja e as proteínas vegetais texturizadas utilizadas em substituição a carne (BERTRAND et al., 1987) são extensivamente produzidos a partir dos produtos primários citados.

Inserida no contexto da importância da atividade industrial de processamento da soja, a presente investigação é focada na simulação e controle da operação contínua de preparação do grão para extração de óleo com solvente. A operação de interesse ocorre em uma câmara contendo uma esteira

transportadora que movimenta um leito de soja extrusada inicialmente a 105 ± 10 °C. O leito é submetido simultaneamente à secagem e resfriamento com ar. A fim de teoricamente descrever o comportamento em estado pseudo-estacionário e em regime transiente do secador e resfriador, um modelo matemático envolvendo duas equações diferenciais parciais, obtidas por balanço material do soluto e de energia na fase sólida do leito de soja, será utilizado. Após uma etapa de confirmação da validade do modelo para reproduzir valores experimentais de umidade e temperatura do sólido na saída de uma esteira de secagem e resfriamento operando em escala industrial, o mesmo será empregado com o propósito de controle.

A etapa de beneficiamento de soja de interesse nesta dissertação é classicamente empregada em unidades industriais. Entretanto, a título de referência serão assumidas neste estudo condições particulares desta operação adotadas em uma unidade de beneficiamento de soja de grande porte do Estado do Paraná. A referida empresa é responsável pela maior capacidade de esmagamento de soja não transgênica do Brasil (≈ 5000 toneladas de grãos por dia), pela produção de 80 % do farelo concentrado de soja comercializado em escala global e pela maior produção mundial de álcool de soja, a qual atinge volumes da ordem de 250 mil litros por mês. O volume de produção desta indústria revela o propósito prático do controle (e futura otimização) da operação de interesse deste trabalho, visto que um ligeiro aumento da eficiência de secagem e resfriamento envolvidos neste estágio de processamento do grão pode promover uma redução considerável do consumo de energia, além de um incremento significativo do volume de óleo removido na etapa posterior de beneficiamento da soja por extração com solvente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O propósito inicial deste capítulo é de fornecer dados atualizados sobre a soja a fim de caracterizar o produto investigado e definir sua importância comercial. Visto que o foco da presente investigação é uma etapa do beneficiamento do grão de soja, é fundamental compreender os diferentes estágios de transformação da matéria-prima *in natura*, o que é tratado introduzindo uma visão geral do beneficiamento da soja. A simulação de processos industriais por meio de modelos matemáticos demanda propriedades termofísicas e de transporte de calor e massa envolvendo o produto de interesse. Neste sentido, um levantamento destas informações disponíveis na literatura e apresentação resumida dos dados obtidos são aspectos que também serão considerados neste capítulo.

2.1 SOJA – CARACTERIZAÇÃO DA PLANTA E PRODUÇÃO

A soja é uma planta pertencente a família *Leguminosae*, subfamília *Faboidae*, gênero *Glycine* e espécie *Glycine Max*. É nativa do sudeste asiático, especificamente da Manchúria, onde seu cultivo estava concentrado em áreas úmidas, próximo a lagos e rios.

As sementes maduras são aproximadamente esféricas e compostas por três partes principais, denominadas de casca, cotilédone e hipocótilo ou germe. A casca contém o hilo, que é a parte de união do grão à vagem. A estrutura básica do grão é mostrada na Figura 2.1. Sojas cultivadas contém aproximadamente 8 % de casca, enquanto 90 % é cotilédone e apenas 2 % é composto por hipocótilo. O cotilédone contém o maior percentual de óleo e proteína no grão da soja, enquanto que a casca os menores valores desses dois compostos (LIU, 1997) (ver Tabela 2.1).

Devido à sua composição química singular, reportada na Tabela 2.1, a soja é uma das mais valiosas “commodities” comercializadas. Em base seca, o grão apresenta 40 % de proteína, 35 % de carboidratos, 5 % de cinzas e aproximadamente 20 % óleo. A umidade do grão comercial é mantida em torno de 10 % (b.u.) para garantir estabilidade e tempo de prateleira, sendo assim em base

úmida o grão apresenta aproximadamente 37 % de proteína, 17,5 % de óleo, 31 % de carboidratos e 4,5 % de cinzas (LIU, 1997).

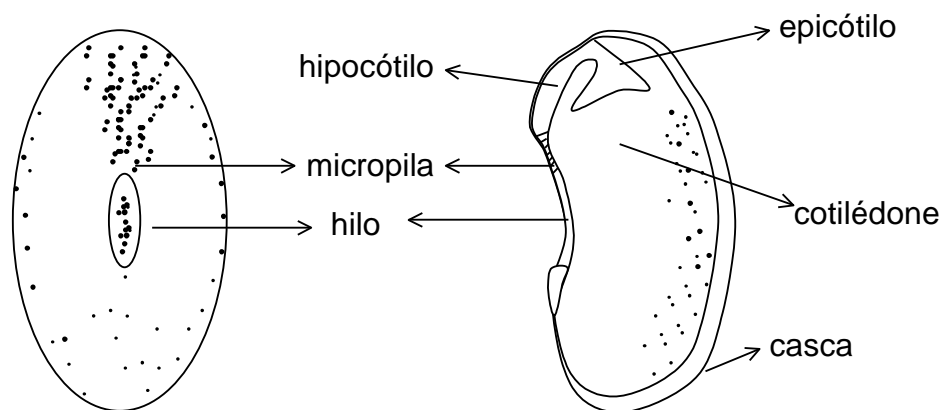


FIGURA 2.1. Partes principais do grão de soja (PERKINS, 1995).

Tabela 2.1 Composição do grão de soja em base seca (Liu, 1997).

Composição	Casca	Hipoótilo	Cotilédone	Grão Inteiro
Proteína (%)	9	41,2	43	40
Lipídeos (%)	1	11,1	23	20
Carboidratos (%)	85,7	43,3	29	35
Cinzas (%)	4,3	4,4	5	5
Total	100	100	100	100

A soja ingressou na América do Norte, América do Sul e quase todos os países da Europa e da África durante a primeira guerra mundial. Embora no Brasil o primeiro registro date de 1914, quando começou a ser cultivada no Rio Grande do Sul. Somente na década de 60 a soja se estabeleceu no cenário agrícola como cultura economicamente importante (EMBRAPA, 2004). No período compreendido entre 1960 e 1969 a produção de soja passou de 206 mil toneladas para 1,056 milhões de toneladas, sendo que 98 % deste volume concentrava-se nos três estados da Região Sul (EMBRAPA, 2004). Apesar deste crescimento significativo nos anos 60, foi somente na década seguinte que a soja se consolidou como a

principal cultura do agronegócio brasileiro, passando de 1,5 milhões de toneladas em 1970 para mais de 15 milhões de toneladas em 1979. Esse crescimento ocorreu não apenas em função do aumento da área cultivada (1,3 para 8,8 milhões de hectares), mas também devido ao expressivo incremento da produtividade (1,14 para 1,73 t/ha) impulsionado pela utilização de novas tecnologias. As décadas de 1980 e 1990 são marcadas pelo início da expansão da cadeia produtiva da soja para as regiões tropicais do Brasil, onde, por exemplo, na Região Centro-Oeste a produção saltou de menos de 2 % em 1970, para 20 % em 1990, 40 % em 2003 e para aproximadamente 60 % da produção nacional em 2010. Essa transformação promoveu o Estado do Mato Grosso, de produtor marginal a líder nacional em volume e produtividade de soja (EMBRAPA, 2004). Apesar deste cenário, o papel do Estado do Paraná no setor produtivo de soja ainda é relevante, pois é o segundo maior produtor nacional e líder de produção na região sul (CONAB, 2011).

No cenário internacional o Brasil mantém forte participação ocupando a segunda posição como produtor e exportador de soja, logo atrás dos Estados Unidos e a frente da Argentina. As Tabelas 2.2 e 2.3 apresentam registros históricos de produção e exportação de soja, respectivamente. Os dados evidenciam que a produção e o comércio mundial de soja em grão mantiveram notável tendência de crescimento durante os últimos anos, apesar de uma certa oscilação negativa de produção nas temporadas 2007/2008 e 2008/2009, e ligeira queda de exportação na temporada de 2008/2009. De acordo com projeções do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o mercado de soja tende a permanecer aquecido nos próximos anos, desde que nenhum fato novo desestabilize a economia mundial de modo a afetar a demanda do produto (USDA, 2011).

Dados análogos aos apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3, porém referentes à importação, revelam que apenas os mercados Chinês e Europeu são responsáveis por quase $\frac{3}{4}$ do total de soja importada em 2010/2011. Esta concentração da importação deve-se, sobretudo, a crescente demanda Chinesa, que desde a safra de 2002/2003 ultrapassou o volume de compras da União

Europeia, sendo que este último tem se mantido estável em $13,99 \pm 1,27$ milhões de toneladas. Este cenário é visto de forma negativa por analistas de mercado (ex., HUBNER, 2010), pois o comércio tem se tornado excessivamente dependente da China, o que intensifica os riscos nos grandes países produtores, como o Brasil, por exemplo.

Tabela 2.2. Produção mundial de soja em milhões de toneladas (USDA, 2011).

País	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/20010	2010/2011
EUA	87	72,86	80,75	91,42	90,61
Brasil	59	61	57,80	69	73,00
Argentina	48,8	46,20	32	54,50	49,50
China	15,07	13,4	15,54	14,98	15,20
Índia	7,69	9,47	9,10	9,70	9,60
Paraguai	5,86	6,90	4	7,20	8,10
Canadá	3,47	2,70	3,34	3,51	4,34
Outros	9,35	7,94	9,44	10,53	11,62
Total	236,23	220,47	211,96	260,84	261,97

Tabela 2.3. Exportação mundial de soja em milhões de toneladas (USDA, 2011).

País	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/20010	2010/2011
EUA	30,39	31,54	34,82	40,85	42,18
Brasil	23,49	25,36	29,99	28,58	32,25
Argentina	9,56	13,84	5,59	13,09	9,50
Paraguai	3,91	4,59	2,23	5,35	5,99
Canadá	1,68	1,75	2,02	2,25	2,83
Outros	1,84	1,70	2,20	2,53	2,88
Total	70,86	78,77	76,84	92,65	95,62

2.2 PROCESSAMENTO DE SOJA

O objetivo desta seção é descrever as operações envolvidas em uma planta de extração de óleo de soja, com especial ênfase na descrição da etapa de

preparação do grão para extração. Este particular interesse na etapa de preparação de grãos é motivado principalmente pelo objetivo do trabalho, mas também porque as diferenças fundamentais entre as plantas de extração de diferentes oleaginosas estão no preparo inicial da matéria-prima para extração (PARAÍSO, 2001), as unidades de separação do solvente e de beneficiamento dos sólidos extraídos, tipicamente encontradas em plantas convencionais de extração de óleos vegetais (CUSTÓDIO, 2003), muito semelhantes em diferentes indústrias. O estágio de extração também será descrito com certo grau de detalhamento, visto que é o processo central das plantas de processamento de soja.

2.1.1 Operações envolvidas na Unidade de Preparo dos Grãos

O preparo das sementes envolve um conjunto de operações físicas que visam a formação de flocos de soja, o que propicia uma operação de extração rápida, econômica e de alto rendimento de extrato. Com exceção da etapa de resfriamento e secagem de soja extrusada, a qual será descrita separadamente por representar o objeto da presente investigação, os demais estágios de transformação da matéria-prima na unidade de preparo de grãos são (CUSTÓDIO, 2003):

- i) Limpeza dos grãos para remoção de materiais que podem contaminar os produtos, reduzir a capacidade do extrator e danificar o equipamento de processamento. Nesta etapa os sólidos passam por duas peneiras vibratórias, sendo que na primeira ficam retidos materiais leves e maiores que os grãos, enquanto que na segunda permanecem os grãos e outras impurezas de menor tamanho;
- ii) Secagem dos grãos até uma umidade de aproximadamente 10 % (b.u.) e posterior armazenamento por um período compreendido entre 1 a 5 dias para que haja equilíbrio de umidade no interior do grão;
- iii) Quebra de grãos para redução das dimensões do material, a fim facilitar os processos subseqüentes de condicionamento e laminação, além de permitir a separação das cascas. A quebra dos grãos ocorre em dois

pares de rolos estriados e rotativos, sendo que no primeiro as estrias são mais profundas e menos numerosas. Com o intuito de provocar ação cisalhante nos grãos, as velocidades dos rolos de um mesmo par são diferentes;

- iv) Descasque dos grãos e separação das cascas, as quais apresentam baixos conteúdos de óleo e proteína. Distintos métodos de descasque têm sido desenvolvidos e aprimorados para diferentes matérias primas, a fim de minimizar custos de operação. Entretanto, no caso da soja existem três procedimentos que são mais freqüentemente utilizados: a) no método Convencional as cascas são separadas após a quebra e antes do condicionamento e da laminação; b) no método Escher-Wyss as cascas são separadas após realizar-se a quebra, sendo que os grãos recebem tratamento térmico inicial com ar quente; c) no método Popping as cascas são removidas após tratamento térmico com divisão das sementes em leito fluidizado, antes mesmo da quebra e da laminação;
- v) Condicionamento dos grãos, o qual é obtido por injeção de vapor direto, de modo que se tenha simultaneamente um aumento de umidade e temperatura dos mesmos. O condicionamento apresenta vários benefícios, dentre os quais convém citar o controle da umidade e da coagulação parcial de proteínas, o incremento na permeabilidade das células, a aglomeração das gotículas de óleo, a redução na viscosidade do óleo, a melhora na plasticidade do material a ser laminado e o aquecimento para extração em temperatura ótima;
- vi) Laminação e expansão de flocos. No primeiro procedimento, o grão já mais maleável e macio que quando *in natura*, é alimentado em aberturas ajustáveis entre rolos de aço, os quais apresentam diâmetros mínimos de 0,5 m e comprimentos entre 1 e 4 m. Os rolos transformam o grão em lâminas de 0,2 a 0,5 mm de espessura, provocando ruptura e distorção das células. Por consequência, a área de contato sólido/solvente é aumentada e o comprimento característico de transferência de massa no interior do sólido é reduzido, fenômeno

eventualmente denominado de permeabilidade (CUSTÓDIO, 2003), favorecendo a extração. Entretanto, é importante destacar que flocos muito finos geram leitos com baixa percolabilidade (capacidade de permitir que uma dada vazão transpasse um leito com área pré-determinada por unidade de tempo). Neste sentido, existe uma condição ótima de operação que propicia uma combinação ideal de transporte de massa interno no floco e percolabilidade no leito. O equipamento utilizado para o processo de expansão da lâmina é um extrusor, onde as partículas após condicionamento e laminação são comprimidas por injeção de vapor direto a pressões bem superiores à do ponto de ebulição da água. Esta etapa favorece a percolabilidade do leito devido a menor presença de finos e melhor drenagem do material sólido ao final da extração, com menor arraste de solvente pelos sólidos. Devido a estas características, um aumento da capacidade de processamento da ordem de 50 a 100 % pode ser alcançado por simples utilização de expansores.

O material que deixa o expansor é alimentado em esteiras de modo a formar um leito de sólidos com temperatura na faixa de 95 a 105 °C e umidade em torno de 13,5 % (b.u.). Este leito de soja extrusada, normalmente transportado a uma velocidade constante, é submetido a uma operação de secagem e resfriamento, a fim de reduzir a temperatura a aproximadamente 61 °C e a umidade para valores na faixa de 9 a 12 % (b.u.). Este processo simultâneo de transferência de calor e massa, objeto de estudo desta dissertação, é extremamente importante para o sucesso econômico de toda a planta, visto que afeta diretamente o rendimento do extrator.

É preciso ressaltar que os sólidos extrusados que deixam o equipamento de secagem e resfriamento são diretamente alimentados no extrator, onde a temperatura e umidade exercem um papel preponderante. Uma temperatura superior a 61 °C acarreta uma volatilização excessiva do solvente na planta, pressurizando-a, e aumentando assim o risco de acidentes de grande magnitude. Valores abaixo de 61 °C reduzem a performance extrativa do óleo, incrementando

as perdas de óleo para o farelo final. Efeitos negativos sobre o processo de extração também são resultantes da utilização de sólidos com umidades inferiores a 9 % ou superiores a 12 %, o que dificulta o movimento do solvente no seio do leito e limita a solubilização do óleo pelo hexano, respectivamente (CUSTÓDIO, 2003).

2.1.2 Extração de Óleo com Solvente

O tipo de técnica de extração de óleos a partir de sementes oleaginosas depende essencialmente do teor inicial de óleo no material a ser processado. Se o conteúdo de óleo for superior a 20 % (como no caso do girassol, canola, algodão) a pré-prensagem deve ser aplicada. Caso contrário deve-se utilizar diretamente a extração por solvente.

O processo de extração por solvente é o mais amplamente utilizado na obtenção de óleos a partir de matrizes vegetais, pois é o mais eficiente em termos de consumo de energia (20 a 25 kWh por tonelada de soja) e residual de óleo na torta (0,8 %) (PARAÍSO, 2001). Neste processo o hexano é o solvente mais freqüentemente empregado. Apesar da denominação do solvente, o mesmo apresenta entre 45 e 90 % de *n*-hexano, sendo que os demais constituintes em proporções significativas são o 2- e 3-metilpentano, o metilciclopentano e o ciclohexano (BOSS, 2000).

Nos processos de extração com solvente, as sementes pré-tratadas são colocadas em contato com o solvente ou mistura óleo-solvente durante um tempo suficiente para que o óleo seja transferido da matriz sólida para o meio fluido. A extração ocorre por percolação do solvente, sendo que no caso da soja a meta é reduzir o teor de óleo dos flocos de um valor em torno de 19 % para um teor inferior a 1 %. Conforme MILLIGAN (1976), o mecanismo de extração com solvente envolve quatro seguintes distintas etapas: a) contato do solvente com a superfície do floco; b) difusão do solvente da superfície do floco até o óleo a fim de dissolvê-lo; c) difusão da mistura do solvente e óleo (miscela) através do floco até atingir a sua superfície; d) drenagem da miscela para outra posição distante do floco extraído (CUSTÓDIO, 2003).

Ao final do processo extrativo obtém-se uma mistura óleo-solvente e uma torta de sólidos. Ambos os produtos são direcionados a operações para remoção e posterior reaproveitamento de solvente (SOARES, 2004), realizadas respectivamente nas unidades de separação do solvente e de beneficiamento dos sólidos extraídos, a fim de minimizar perdas de solvente e de qualidade dos produtos finais.

2.3 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E DE TRANSPORTE DA SOJA

Densidade, umidade de equilíbrio e calor específico de soja são propriedades termofísicas extensivamente reportadas na literatura (ALAM e SHOVE, 1973; ASAE, 1999; OSBORN et al., 1989; DESHPANDE e BAL, 1999; NUNES, 2000; AVIARA et al., 2011).

Tabela 2.4. Densidade aparente da soja seca.

ρ_b (kg m ⁻³) para M=0	Referência	ε (ZINK, 1935)	ρ_a (kg m ⁻³)
734,5	Calculado com equação de BRUSEWITZ (1975)	0,338	1110
		0,361	1149
660	Calculado com equação de ZANOELO et al. (2011) com densidade da água igual a 1000 kg m ⁻³ e dados de soja úmida de STETSON e NELSON (1972) e NELSON e STETSON (1975)	0,338	989
		0,361	1025
649		0,338	989
		0,361	1025
714		0,338	1079
		0,361	1117

A densidade real da soja extrusada não é diretamente requerida nesta investigação, mas a partir do conhecimento desta propriedade e conhecendo a porosidade do leito de soja extrusada é possível estimar o coeficiente efetivo de transporte de massa (kg m⁻² s⁻¹) e de calor (W m⁻² °C⁻¹) em unidades que permitam a comparação com coeficientes análogos reportados na literatura. Embora dados de densidade real do material investigado não sejam disponíveis, dados de

densidade aparente (ρ_a) (quando o volume de poros internos é desprezado) podem ser calculados a partir de valores disponíveis de densidade (ρ_b) e porosidade (ε) de leitos de grãos inteiros de soja (ZINK, 1935; BRUSEWITZ, 1975). A Tabela 2.4 reporta valores de densidade aparente de soja seca obtidos com a Equação (2.1) em função das propriedades citadas.

$$\rho_a = \frac{\rho_b}{(1-\varepsilon)} \quad (2.1)$$

A umidade de equilíbrio é uma propriedade de sólidos que depende do basicamente da umidade relativa e temperatura. Esta propriedade é extremamente importante para os presentes propósitos, pois o menor valor de umidade possível de umidade na câmara de secagem e resfriamento é determinado pela umidade de equilíbrio da soja. Expressões empíricas para cálculo de umidade de equilíbrio são reportadas na literatura (OSBORN et al., 1989; ASAE, 1999; BONIFÁCIO et al., 1993 ou BARROZO et al., 1996) e são apresentadas na sequência.

$$M_e = 10^{-2} \left[\frac{-\exp(2,87 - 0,0054T_g)}{\ln(UR)} \right]^{0,725} \quad (2.2)$$

$$M_e = 10^{-2} \left[\frac{-\exp(3,045 - 0,0054T_g)}{\ln(UR)} \right]^{0,658} \quad (2.3)$$

$$M_e = 10^{-2} \left[\frac{-\exp(3,02 - 0,0067T_g)}{\ln(UR)} \right]^{0,662} \quad (2.4)$$

A Equação (2.2) (OSBORN et al., 1989) teve os parâmetros ajustados a resultados experimentais obtidos nas temperaturas de 10, 25 e 40 °C, e na faixa de umidades relativas entre aproximadamente 0,7 e 0,9. De forma semelhante foi

obtida a correlação empírica reportada por BONIFÁCIO et al. (1993) (ou BARROZO et al., 1996) (Equação 2.4), porém o procedimento de ajuste dos parâmetros das equação de Halsey Modificada envolveu dados experimentais de umidade de equilíbrio para soja determinados nos intervalos de temperatura e umidade relativa iguais a 25-50 °C e 0,11-0,84, respectivamente.

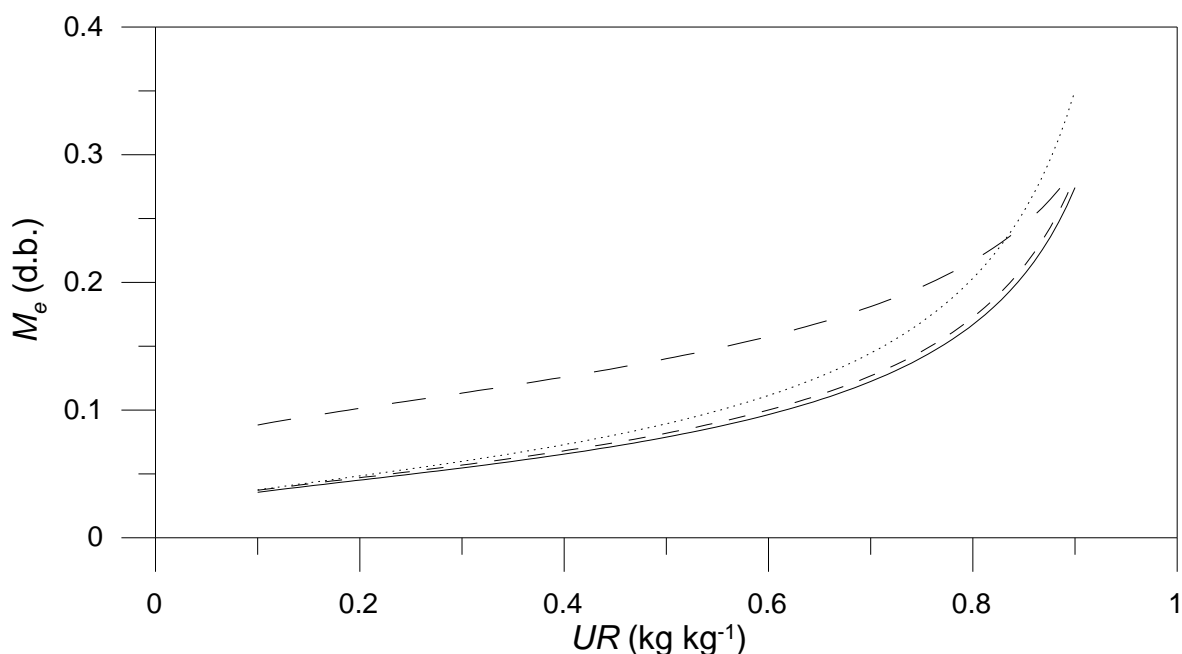


FIGURA 2.2. Isoterma de equilíbrio para a soja a 40 °C. Linha pontilhada: Equação (2.2); linha tracejada: Equação (2.3); linha sólida: Equação (2.4); linha com traços longos: Equação (2.5).

Dados experimentais mais recentes de umidade de equilíbrio para soja, juntamente com um modelo (Equação 2.5) análogo as Equações (2.2) a (2.4), foram obtidos por AVIARA et al. (2004) em um intervalo mais amplo de condições de operação (UR : 0,07-0,97; T_g : 40 a 70 °C). Entretanto, uma significativa discrepância foi observada entre os resultados das três equações anteriores e as umidades de equilíbrio calculadas com a Equação (2.5), o que sugere uma maior incerteza nos resultados obtidos por AVIARA et al. (2004). A título de exemplo a Figura 2.2 evidencia esta diferença para uma isoterma a 40 °C.

$$M_e = 10^{-2} \left\{ \frac{-\exp[18,605 - 0,0387(T_g + 273)]}{\ln(UR)} \right\}^{0,385} \quad (2.5)$$

O calor específico da soja seca é uma propriedade térmica requerida para resolver a equação diferencial que surgirá em decorrência do balanço de energia na fase sólida do secador. A Tabela 2.5 reporta dados desta propriedade disponíveis na literatura.

Tabela 2.5. Calor específico da soja seca.

Cp_{ss} (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Referência
1637	ALAM e SHOVE (1973)
1444	DESHPANDE e BAL (1999)
1970	NUNES (2000)
1411	AVIARA et al. (2011)

Coefficientes efetivos de transporte de massa são disponíveis na literatura para secagem de soja (HUTCHINSON e OTTEN, 1982; SOUZA et al., 1993). Entretanto, ainda que os mesmos tivessem sido determinados em ensaios envolvendo propriedades do ar em condições análogas as adotadas nesta investigação, dificilmente poderiam ser presentemente empregados com propósito preditivo. Este fato ocorre principalmente por que os resultados das fontes citadas foram obtidos para leitos finos e envolvendo grãos inteiros, com impacto direto sobre a porosidade do leito e dimensão característica do transporte interno de massa. Como será visto em detalhe no decorrer deste trabalho, o leito cuja umidade pretende-se controlar, apresenta características completamente distintas das citadas, como por exemplo um grau de compactação elevado, visto que provém de uma etapa preliminar de extrusão com vapor a alta pressão. Estas diferenças tem efeito significativo na transferência de massa do soluto por difusão e convecção.

Dificuldades adicionais, ainda que possam ser contornadas, também impedem uma comparação direta entre os coeficientes da literatura e as

resistências efetivamente encontradas no sistema presentemente sob investigação. Por exemplo, em uma das referências citadas (SOUZA et al., 1993) o modelo de secagem aplicado envolve um coeficiente efetivo para o período de velocidade constante e outro para o de queda de velocidade. Um problema similar acontece com os dados encontrados por HUTCHINSON e OTTEN (1982), porém neste caso o modelo de secagem empregado é o de Page (ver Equação 2.6), o qual é diferente do modelo de Lewis (ZANOELO et al., 2007) utilizado nesta dissertação (Equação 3.1 com $\delta M/\delta x=0$). Em função destes aspectos, os referidos coeficientes (HUTCHINSON e OTTEN, 1982; SOUZA et al., 1993) não serão aqui reportados.

$$\frac{M-M_e}{M_i-M_e} = \exp(-k'_m t^n) \quad (2.6)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta inicialmente uma descrição da metodologia experimental utilizada para obtenção das curvas de secagem e de resfriamento em um secador batelada de laboratório. Estes dados serão requeridos para ajuste dos coeficientes efetivos de transporte de calor e massa envolvidos na solução do modelo matemático que representa o processo sob investigação. As características do secador-resfriador industrial de soja extrusada, o qual é utilizado para obtenção de dados experimentais para validação do modelo em condições de operação em escala industrial, também serão reportadas, assim como o procedimento de determinação das variáveis experimentais de interesse para simulação do processo.

Uma etapa de modelagem é incluída nesta seção, a fim de detalhar o procedimento de obtenção das equações que descrevem o processo de secagem e resfriamento de soja nos secadores/resfriadores de laboratório (batelada) e industrial (contínuo). Uma estratégia de controle simultâneo da umidade e temperatura do leito na descarga do equipamento investigado será finalmente proposta.

3.1 EXPERIMENTOS

3.1.1 Matéria prima

Utilizou-se soja extrusada convencional (não transgênica), cedida pela empresa IMCOPA S.A. (Araucária, PR) como matéria prima para os experimentos laboratoriais e em escala industrial. O material em questão apresentava tipicamente 20 % de óleo, 2,3 % de fibra e 39,1 % de proteína. A determinação destes percentuais envolveu análises físico-químicas com a soja *in natura*, em uma etapa anterior a secagem e descascamento, e balanços de massa nas citadas unidades de preparação do material.

O teor de proteína (nitrogênio) foi determinado pelo método de Kjeldahl otimizado (PERSSON et al., 2008), o qual não distingue o nitrogênio proveniente da proteína de outros compostos nitrogenados. O procedimento experimental

envolveu essencialmente a utilização de um digestor (BD-8, FOSS) operando com ácido sulfúrico a 420 °C, e um destilador (Kjeltec 2200, FOSS) com ácido bórico. O percentual de fibra (bruta) foi por sua vez obtido por perda por incineração do resíduo remanescente seco após tratamento da amostra em um digestor (MA-450, Marconi) com ácido sulfúrico e hidróxido de sódio diluídos como especificado nas condições do teste Ba 6-84 (AOCS, 2004). Para medida da quantidade de óleo utilizou-se o método Ba 3-38 (AOCS, 2004) de extração a quente com éter de petróleo e/ou hexano.

3.1.2 Ensaios Laboratoriais

Amostras com cerca de 0.4 kg foram utilizadas nos ensaios de secagem e resfriamento em fase laboratorial. As amostras foram coletadas na alimentação do secador-resfriador industrial (logo após a etapa de extrusão), acondicionadas de forma a evitar perda de umidade e imediatamente conduzidas aos ensaios de secagem e resfriamento em equipamento batelada de laboratório.

Os experimentos foram conduzidos de forma que a massa de material anteriormente reportada foi uniformemente distribuída sobre um leito trapezoidal, construído com folhas de alumínio, com dimensões de 0,2 x 0,2 x 0,05 m (CxLxA). O leito foi hermeticamente fechado, conduzido a uma estufa (modelo Q314M, QUIMIS) e mantido a temperatura de 95 °C durante aproximadamente 15 minutos para alcançar a temperatura próxima a entrada do secador industrial. Neste estágio dos ensaios, a estufa com controle PID de temperatura e resolução de ± 1 °C foi operada sem circulação de ar, a fim de reduzir a possibilidade de perda de umidade por alguma abertura acidental no leito.

Na seqüência dos experimentos, a temperatura da estufa foi reduzida para 30 °C, a circulação de ar a uma vazão de $0,133 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ foi acionada e mantida constante (pois tratava-se de um exaustor acoplado a estufa de secagem), e a cobertura superior do leito foi removida de modo a permitir a secagem e resfriamento do material. A temperatura do leito passou a ser monitorada em intervalos regulares de 30 s com um mini sensor infravermelho (Modelo 66, FLUKE) com incerteza de ± 1 °C. Com a mesma frequência a massa do leito foi

determinada, porém empregando uma balança digital (ADVENTURER PRO AV3102P, Toledo do Brasil Indústria de Balanças Ltda) com resolução de $\pm 10^{-3}$ kg. Em ambos os casos as medições ocorreram por 1800 s, quando variações de massa e temperatura não foram mais detectadas. O método gravimétrico Ba 6-84 foi empregado para determinação da umidade (AOCS, 2004), sendo que a massa de material seco de cada amostra foi determinada após a permanência das mesmas em estufa operando a 103,2 °C durante quatro horas.

Todo o procedimento descrito foi repetido de maneira a considerar todas as combinações possíveis envolvendo variações de dois e três níveis da temperatura inicial (95, 100 °C) e de resfriamento (30, 40, 50 °C), respectivamente. Em outras palavras, significa que um total de 6 experimentos ($2^1 \times 3^1$) de secagem e resfriamento simultâneo foram realizados no secador de batelada de laboratório. Em todos os ensaios as temperaturas de bulbo seco e úmido do ar foram medidas. De posse das mesmas, e com auxílio de uma carta psicrométrica, as umidades relativas requeridas para cálculo da umidade de equilíbrio nas condições de secagem foram determinadas.

3.1.3 Ensaios Industriais

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente o equipamento contínuo utilizado como referência para a modelagem e controle do processo simultâneo de secagem e resfriamento de soja extrusada. Os ensaios realizados neste equipamento, os quais serão descritos em seguida, tiveram o objetivo específico de fornecer perfis transientes de umidade e temperatura do leito de soja na descarga do equipamento sob condições de operação conhecidas. Desta forma, a validação do modelo dinâmico a ser proposto torna-se viável em condições industriais reais, o que possibilita que o mesmo seja aplicado com propósitos práticos, como por exemplo, para controle e otimização da operação investigada.

O secador-resfriador industrial (modelo RSH-2000-001, Alliance Industrial Mecânica LTDA) demonstrado na Figura 3.1 apresenta acionamento direto e corrente de arraste interna, possui quatro blocos externos estruturais que formam seu corpo, além do módulo de alimentação e de saída. O equipamento possui dois

exaustores com vazões distintas que aspiram o ar contido no secador e exaurem para a atmosfera, um ventilador que aspira o ar atmosférico e o transfere para a parte interna do secador-resfriador e um ultimo que aspira o ar da parte interna final do secador e o alimenta para a entrada do secador, conforme Figura 3.1. O leito de soja extrusada formado no secador possuía as seguintes dimensões 15,6x2x0,5 m (CxLxA).

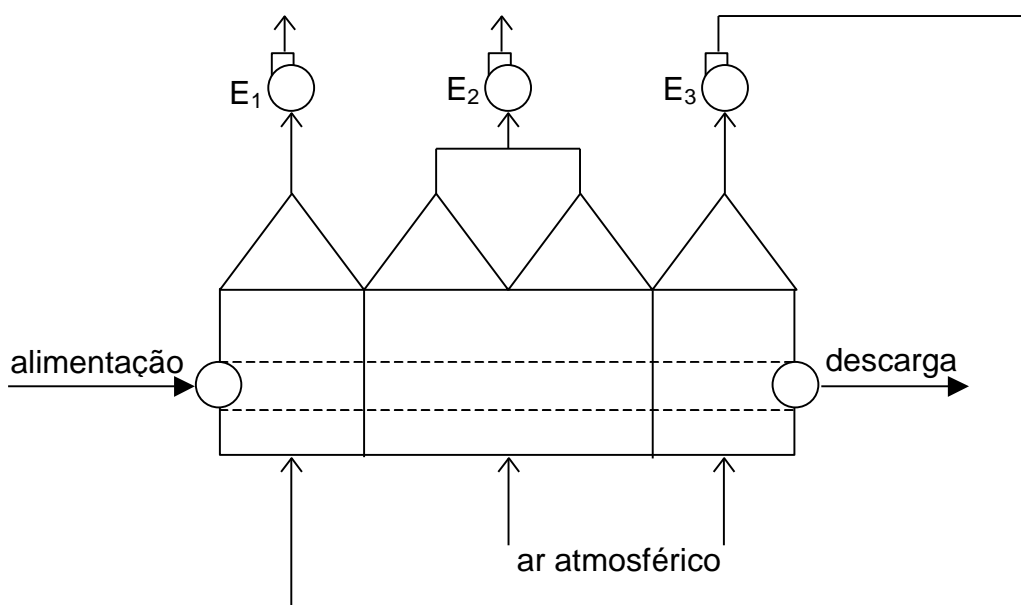


Figura 3.1. Desenho esquemático do secador-resfriador estudado. E₁, E₂ e E₃ são os exaustores envolvidos na operação.

A determinação dos dados requeridos para validação do modelo em condições industriais envolveu basicamente a obtenção de amostras utilizadas para definir a temperatura e umidade do leito nos extremos do equipamento em diferentes momentos do processamento. Convém destacar que um intervalo de 230 s foi deixado transcorrer entre as amostragens nestas distintas posições. Este procedimento foi adotado a fim de garantir que uma amostra do mesmo material com propriedades determinadas na alimentação fosse recolhida na descarga do equipamento. Obviamente, o tempo em questão é o de residência do produto no equipamento, o qual foi estimado a partir dos dados de velocidade do motor (1750

rpm), relação de redução (1/200) e diâmetros das engrenagens do redutor (0,15 m) e de acionamento (0,56 m).

As amostras na descarga foram recolhidas na base, no meio e no topo do leito de soja extrusada. O mesmo procedimento não foi adotado na alimentação devido as características homogêneas do material nesta posição da esteira. As medidas de temperatura e umidade dos diferentes pares de amostras (alimentação, descarga) foram realizados com métodos e equipamentos idênticos aos empregados para determinação das mesmas propriedades nos ensaios cinéticos em laboratório.

3.2 EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO E SOLUÇÃO DOS MODELOS

A representação matemática do presente processo de secagem e resfriamento depende essencialmente de um balanço de massa e energia em um elemento infinitesimal de volume do leito sobre a esteira de processamento contínuo, apresentado esquematicamente na Figura 3.2.

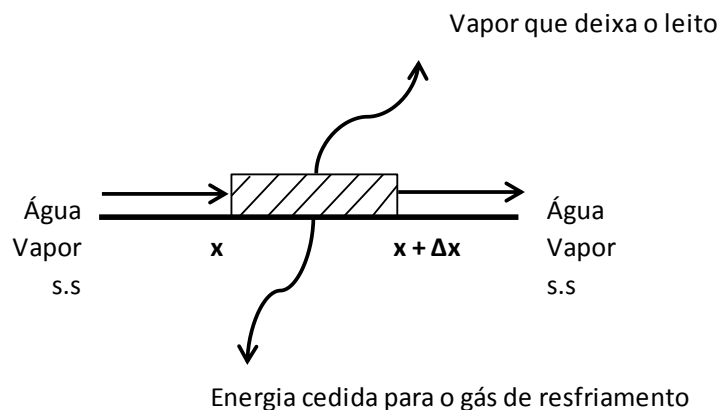


Figura 3.2. Esquema do volume de controle adotado no modelo

A Equação (3.1) é resultante da aplicação do balanço de massa para o soluto. O primeiro termo a direita da igualdade representa a variação de umidade do sólido devido ao movimento da esteira, enquanto que o segundo denota a

perda de umidade para a fase gás em função do transporte de massa do soluto, teoricamente por uma combinação de mecanismos difusivos e convectivos.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -u_c \frac{\partial M}{\partial x} - k_m(M - M_e) \quad (3.1)$$

O procedimento de obtenção da Equação (3.1) é apresentado em detalhe nos trabalhos de ABITANTE (2007) e JENSEN (2011), sobre secagem de erva-mate em secadores contínuos de esteira, e portanto não será repetido nesta dissertação. Entretanto, o balanço de energia apresenta particularidades quando comparado a um processo convencional de secagem, e sendo assim, requer uma análise detalhada. Embora no decorrer do equacionamento do BE estas diferenças fiquem evidentes, convém aqui ressaltar as considerações mais relevantes: *i)* o gás de secagem apresenta-se em uma temperatura inferior a do leito de sólidos durante todo o tempo de residência do produto na esteira; *ii)* o leito constituído por uma mistura de água líquida e matéria seca com vapor em seus poros, o qual foi formado e retido devido ao processo simultâneo de aquecimento e compressão da matéria prima no estágio de extrusão; *iii)* não ocorre mudança de fase parcial ou total da água inicialmente alimentada na esteira, e por conseqüência termos de calor latente de vaporização e condensação são negligenciados; *iv)* toda a perda de umidade decorre da remoção do vapor contido nos poros do leito alimentado; *v)* o ar introduzido no secador-resfriador é envolvido unicamente na troca de calor sensível com a matéria constituinte do leito (água líquida, matéria seca e vapor) e como meio de transporte do vapor.

Assim como ocorreu no balanço material assumiu-se irrelevante a variação das propriedades do leito ao longo de sua espessura (direção *y*) e largura (direção *z*), o que diminuiu consideravelmente a complexidade do modelo proposto. O leito foi alimentado homogeneamente na extensão lateral da esteira e o gás de secagem não apresentava perfis radiais de temperatura, o que torna a hipótese de homogeneidade das propriedades do leito na direção *z* consistentes. No que se refere a altura, convém lembrar que as propriedades do leito foram

determinadas em três diferentes posições do leito, porém as variações foram consideradas não significativas. A Figura 3.2 evidencia a hipótese assumida de transferência unidimensional em regime transiente.

$$\begin{aligned}
& m_{ss} \{ Cp_{ss} [(T_s)_x - (T_s)_{x+\Delta x}] + M_e Cp_l [(T_s)_x - (T_s)_{x+\Delta x}] \} \\
& + m_{ss} Cp_v \{ [(M - M_e)(T_s)]_x - [(M - M_e)(T_s)]_{x+\Delta x} \} \\
& - ha_p (T_s - T_g) - ka_p (M - M_e) [Cp_v (T_s - T_g)] \\
& = \rho_{ss} V_s \frac{d\{ [Cp_{ss} + M_e Cp_l + (M - M_e) Cp_v] T_s \}}{dt}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

A Equação (3.3) é obtida dividindo-se a (3.2) pelo volume do leito. Nesta última expressão, a vazão mássica m_{ss} é representada como o produto da densidade pela vazão volumétrica de sólido seco.

$$\begin{aligned}
& \frac{\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon)}{\Delta x} \{ Cp_{ss} [(T_s)_x - (T_s)_{x+\Delta x}] + M_e Cp_l [(T_s)_x - (T_s)_{x+\Delta x}] \} \\
& + \frac{\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon)}{\Delta x} Cp_v \{ [(M - M_e)(T_s)]_x - [(M - M_e)(T_s)]_{x+\Delta x} \} \\
& - ha(T_s - T_g) - ka(M - M_e) [Cp_v (T_s - T_g)] \\
& = \rho_{ss} (1 - \varepsilon) \frac{d\{ [Cp_{ss} + M_e Cp_l + (M - M_e) Cp_v] T_s \}}{dt}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Aplicando limite aos dois primeiros termos da ED acima para quando Δx tende a zero e dividindo-a por $\rho_{ss}(1-\varepsilon)$ obtém-se imediatamente a Equação (3.4).

$$\begin{aligned}
& -u_c \left\{ C_{p_{ss}} \frac{\partial T_s}{\partial x} + M_e C_{p_l} \frac{\partial T_s}{\partial x} + C_{p_v} \frac{\partial [(M - M_e) T_s]}{\partial x} \right\} \\
& - h_m (T_s - T_g) - k_m (M - M_e) [C_{p_v} (T_s - T_g)] \\
& = \frac{\partial \{ [C_{p_{ss}} + M_e C_{p_l} + (M - M_e) C_{p_v}] T_s \}}{\partial t}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Após rearranjo da Equação (3.4) e aplicação da regra dos produtos para derivadas é obtida a Equação (3.5).

$$\begin{aligned}
& C_{p_{ss}} \frac{\partial T_s}{\partial t} + M_e C_{p_l} \frac{\partial T_s}{\partial t} + C_{p_v} (M - M_e) \frac{\partial T_s}{\partial t} + C_{p_v} T_s \frac{\partial M}{\partial t} = \\
& -u_c \left\{ C_{p_{ss}} \frac{\partial T_s}{\partial x} + M_e C_{p_l} \frac{\partial T_s}{\partial x} + C_{p_v} (M - M_e) \frac{\partial T_s}{\partial x} + C_{p_v} T_s \frac{\partial M}{\partial x} \right\} \\
& - h_m (T_s - T_g) - k_m (M - M_e) [C_{p_v} (T_s - T_g)]
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Na Equação (3.6) as derivadas parciais da temperatura do leito são colocadas em evidência.

$$\begin{aligned}
& [C_{p_{ss}} + M_e C_{p_l} + C_{p_v} (M - M_e)] \frac{\partial T_s}{\partial t} = \\
& -u_c [C_{p_{ss}} + M_e C_{p_l} + C_{p_v} (M - M_e)] \frac{\partial T_s}{\partial x} \\
& - C_{p_v} T_s \left(\frac{\partial M}{\partial t} + u_c \frac{\partial M}{\partial x} \right) \\
& - h_m (T_s - T_g) - k_m (M - M_e) [C_{p_v} (T_s - T_g)]
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Isolando-se a derivada da temperatura do leito em relação ao tempo e utilizando a Equação (3.1) (balanço material) para representar o termo que envolve a soma das derivadas parciais da umidade, obtém-se prontamente a Equação (3.7).

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_s}{\partial t} = & -u_c \frac{\partial T_s}{\partial x} + \frac{Cp_v T_s k_m (M - M_e)}{[Cp_{ss} + M_e Cp_l + Cp_v (M - M_e)]} \\ & - \frac{h_m (T_s - T_g) - k_m (M - M_e) [Cp_v (T_s - T_g)]}{[Cp_{ss} + M_e Cp_l + Cp_v (M - M_e)]} \end{aligned} \quad (3.7)$$

A Equação (3.8) é a expressão final do BE obtida por simplificação dos termos que envolvem o produto $Cp_v T_s$. O primeiro termo a direita da igualdade determina a variação de temperatura do leito de soja em decorrência da movimentação da esteira, enquanto o segundo expressa o calor transportado para o ar de resfriamento por condução e convecção, e a transferência de calor envolvendo a movimentação de vapor no volume de controle.

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = -u_c \frac{\partial T_s}{\partial x} + \frac{h_m (T_g - T_s) + k_m (M - M_e) Cp_v T_g}{[Cp_{ss} + M_e Cp_l + Cp_v (M - M_e)]} \quad (3.8)$$

Os parâmetros de transporte de massa e calor das Equações (3.1) e (3.8) foram obtidos com o método Simplex de otimização (JENSON e JEFFREYS, 1977) envolvendo as funções objetivo definidas pelas Equações (3.9) e (3.10), respectivamente. Cabe destacar que o cálculo dos perfis de umidade com a Equação (3.1) independe da solução do balanço de energia. Sendo assim, somente os resultados experimentais de umidade foram utilizados no procedimento de ajuste de k_m . Os valores de h_m requeridos para computar as variações de temperatura do leito de sólidos por meio da Equação (3.10) foram ajustados somente após a obtenção de k_m nas diferentes temperaturas de secagem investigadas. As determinações de ambos os parâmetros de transporte

citados envolveram exclusivamente o conjunto de dados experimentais de umidade e temperatura durante a secagem e resfriamento de soja extrusada alimentada no secador de laboratório a 100 °C.

$$f_M = \sum_{j=1}^J \left| M_{calc.}^j - M_{exp.}^j \right| \quad (3.9)$$

$$f_T = \sum_{j=1}^J \left| T_{s_{calc.}}^j - T_{s_{exp.}}^j \right| \quad (3.10)$$

O sistema de equações diferenciais parciais representado pelas Equações (3.1) e (3.8) foi resolvido numericamente por aplicação do método das linhas e uma equação de diferenças finitas para trás a fim de aproximar as derivadas primeiras no espaço e no tempo. No entanto, soluções análogas para quando sistema de EDs parciais transforma-se em um sistema de EDs ordinárias, como ocorre em um secador batelada ou em um secador industrial de esteira em condições pseudo-estacionárias, foram obtidas por aplicação do método numérico de Runge-Kutta de 4ª ordem. Em todos os casos, rotinas computacionais em linguagem FORTRAN foram escritas para implementação dos métodos numéricos empregados.

3.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Um clássico controle por realimentação é proposto para controlar a temperatura do leito na descarga do secador-resfriador. Nesta estratégia de controle assume-se como *set-point* uma temperatura de $61 \pm 1,5$ °C. O limite superior é estabelecido por questões de segurança para a operação da planta de extração de óleo, onde a unidade de secagem e resfriamento investigada encontra-se inserida. Em especial esta temperatura é definida a fim de evitar um incremento excessivo da pressão de vapor do hexano no extrator, o que pressurizaria o equipamento de extração e poderia ocasionar acidentes de

grandes proporções. Em contra-partida, o limite inferior é requerido a fim de não reduzir demasiadamente a solubilidade do óleo no solvente pois na eventualidade de isto ocorrer a extração seria caracterizada por maiores tempos de extração com impacto negativo nos custos operacionais.

No presente processo, também seria desejável que a umidade do sólido na saída do secador estivesse no intervalo de $0,111 \pm 0,012$ em base seca. Novamente neste caso, a variação de umidade que ultrapasse este intervalo admissível tem um efeito adverso no processo. Em particular, umidades maiores que o limite superior provocam diminuição da percolabilidade do solvente no leito extrator. Em contra-partida, umidades menores que 0,099 aumentam a perda do solvente para a fase sólida, provocando um aumento da carga energética para a remoção deste excesso de hexano na etapa de dessolventização do farelo. Apesar destes problemas, a umidade da soja extrusada não estará sujeita a controle nesta investigação, mas ficará condicionada as condições impostas ao processo a fim de manter a temperatura de descarga no *set-point* previamente especificado.

Assumem-se presentemente como perturbações do processo alterações na umidade e temperatura de alimentação do sólido, assim como de temperatura e umidade absoluta médias do ar de secagem. O intervalo de variação das propriedades do sólido na entrada do secador-resfriador foi preliminarmente verificado com base em 29 medidas de umidade e temperatura em seis diferentes turnos de operação nos meses de fevereiro, maio, julho, agosto e novembro de 2011. Embora o procedimento normal seria estimar os limites com base em oscilações dinâmicas em torno de um valor médio envolvendo o desvio padrão de cada variável (ou seja: $0,149 \pm 0,007$ b.s.; $106,5 \pm 3,3$ °C), a fim de verificar a eficiência do controle sob condições mais severas de perturbação, os limites foram definidos em função dos valores mínimos e máximos encontrados nas 29 medidas realizadas.

De maneira análoga foram verificadas as variações nas propriedades do gás em situações reais de operação do secador-resfriador industrial. Neste caso foram realizadas 16 medidas das variáveis de interesse em condições

atmosféricas e na saída dos três exaustores representados na Figura 3.1 em cinco diferentes turnos de operação nos meses de maio, julho, agosto e novembro de 2011. Pela mesma motivação reportada no parágrafo anterior, e também devido ao menor número de medidas das propriedades do gás, a performance do controlador foi de fato testada assumindo variações superiores as encontradas para estas variáveis, as quais não ultrapassaram $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,002\text{ kg kg}^{-1}$, respectivamente.

Em síntese, no que se refere as perturbações, pode-se dizer que a estratégia de controle foi investigada considerando oscilações dinâmicas das variáveis M_i , T_{si} , T_g e U com os seguintes limites impostos para as variações, respectivamente: 0,133 a 0,165 (b.s.); 98 a 115 $^{\circ}\text{C}$; 47,7 a 58,3 $^{\circ}\text{C}$; 0,0615 a 0,0751. As perturbações foram geradas em instantes aleatórios pela biblioteca IMSL do Compaq Visual Fortran assumindo uma probabilidade de troca de 90 % ($\alpha=0,9$), o que pressupõe variações maiores do que as encontradas na indústria. Convém ressaltar que um ruído branco e um sinal constante seriam produzidos caso fossem assumidos valores de α iguais a zero e 1, respectivamente. Diferentes sementes foram consideradas para as perturbações randômicas de cada variável, o que pode evitar tendências indesejáveis em caso de simulações frente a perturbações simultâneas na umidade do sólido, temperatura do sólido, temperatura do gás e umidade do gás.

Um controlador proporcional-integral-derivativo (PID), o qual é quase que exclusivamente empregado em motores elétricos acoplados a variadores de velocidade (BARTON e LEWIN, 2000), foi adotado para ajustar o tempo de residência do leito de soja extrusada no secador-resfriador por manipulação da velocidade da esteira sobre a qual o mesmo é alimentado. A utilização da velocidade da esteira como variável manipulada, ao invés da temperatura do meio de secagem, tipicamente adotada nestes tipos de secadores (VAN'T LAND, 1991; KIRANOUDIS et al., 1994; KIRANOUDIS et al., 1995), foi empregada com sucesso em processos semelhantes de secagem de erva-mate (ZANOELO et al., 2008; JENSEN et al., 2011), porém para controle de umidade do sólido. O modelo transiente representado pelo sistema de equações diferenciais parciais

apresentado na secção 3.2 (Equações 3.1 e 3.8) foi adotado como secador-resfriador virtual.

Visto que em sistemas de controle similares (TEMPLE et al., 2000; ZANOELO et al., 2008), os procedimentos clássicos (Cohen e Coon; Ziegler-Nichols) de sintonia do controlador (STEPHANOPOULOS, 1984) não se apresentaram suficientemente robustos (JENSEN et al., 2011), adotou-se neste trabalho o ajuste dos parâmetros do controlador por minimização da integral do quadrado dos resíduos (ISE) (Equação 3.11) envolvendo o método Simplex de otimização (JENSON e JEFFREYS, 1977). A simulação do processo realizada com este propósito foi iniciada com uma esteira de 14,4 m de comprimento rodando sem carga a uma velocidade de $0,08 \text{ m s}^{-1}$. Em um instante $t + \Delta t$ o secador-resfriador passou virtualmente a ser alimentado com soja extrusada a umidade média e temperatura típicas de 0,149 (b.s.) e $106,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Assim como na planta industrial, assumiu-se que o ar de secagem e resfriamento era soprado perpendicularmente ao leito a uma temperatura média de $53 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade absoluta igual a $0,0683 \text{ kg kg}^{-1}$. Após exatamente 180 s de operação, correspondente ao tempo em que o sensor de infravermelho passaria a medir a temperatura de descarga do leito, um *set-point* de $61,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ passa a ser imposto e assim se mantém por um intervalo de 3600 s de operação.

$$ISE = \int_0^t [T_s(t) - T_{s_set}]^2 dt \quad (3.11)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 4.1, 4.3 e 4.5 apresentam as curvas cinéticas de umidade de soja alimentada a 100 °C em um secador de batelada operando a 30, 40 e 50 °C, respectivamente. Os perfis de temperatura do material nas mesmas condições de secagem e resfriamento são reportados nas Figuras 4.2, 4.4 e 4.6. Uma redução do tipo exponencial é aproximadamente observada para ambas as variáveis de interesse. Idênticos resultados experimentais são encontrados nas Figuras 4.7 a 4.12 para uma temperatura inicial do leito de 95 °C. Este fato evidencia que perturbações da ordem de apenas 5 °C na temperatura de alimentação do secador industrial não devem alterar significativamente o comportamento dinâmico do processo de secagem e resfriamento, e por consequência as propriedades do produto na descarga do equipamento.

Em oposição ao que foi constatado sobre a influência da temperatura inicial, uma comparação entre perfis experimentais obtidos em diferentes temperaturas de secagem demonstra um efeito importante desta última variável sobre a cinética do processo investigado. A título de exemplo, perfis de umidade obtidos nas temperaturas de 30 e 50 °C são confrontados na Figuras 4.5, onde prontamente observa-se que o incremento da temperatura reduz a umidade do produto. Este comportamento é atribuído à clássica diminuição da resistência a transferência de massa por difusão e convecção e à queda da umidade de equilíbrio devido ao aumento da temperatura de secagem.

Na Figura 4.6 observa-se o efeito global do mesmo fator sobre a cinética de resfriamento. Entretanto, neste caso torna-se mais complexo apontar as razões responsáveis pelo comportamento observado, visto que uma maior variedade de fenômenos influenciados pela temperatura do ar são considerados no mecanismo de transferência de calor (observar o balanço de energia na secção 3.2). De modo geral, o incremento da temperatura do meio de secagem parece reduzir o tempo total de resfriamento.

Nas Figuras 4.1 a 4.12 também são reportados os valores de umidade e temperatura do leito obtidos por solução simultânea das Equações (3.2) e (3.8).

Observa-se que o modelo proposto descreve corretamente a secagem e resfriamento do leito em todas as condições investigadas.

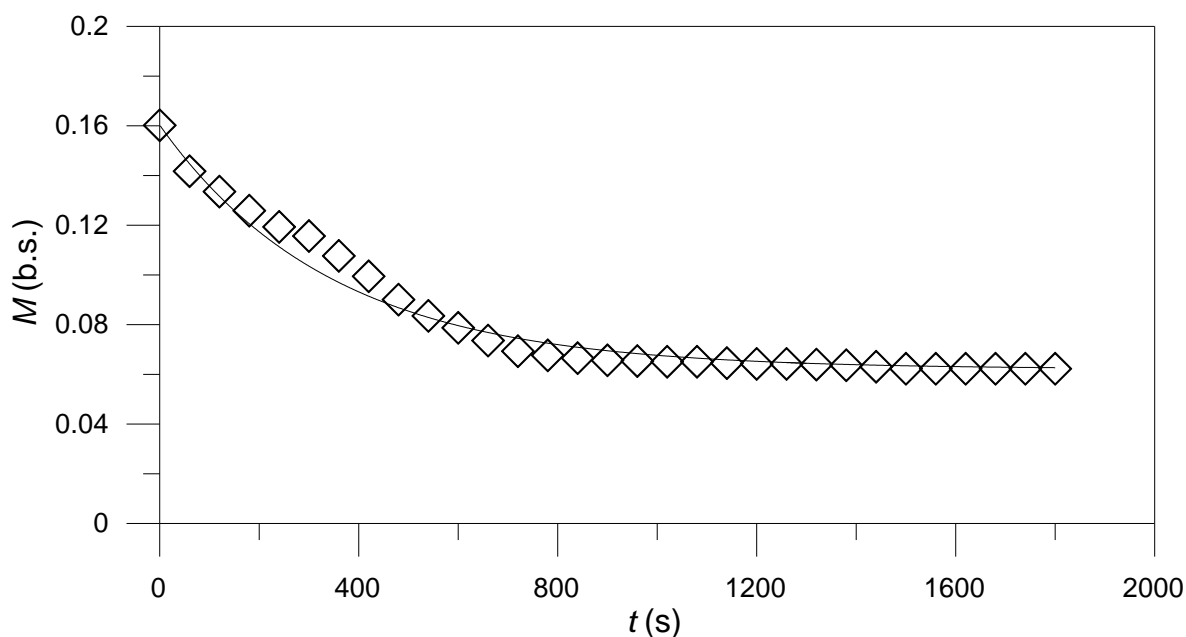


Figura 4.1. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leito soja alimentado a 100 °C em um secador batelada operando a 30 °C.

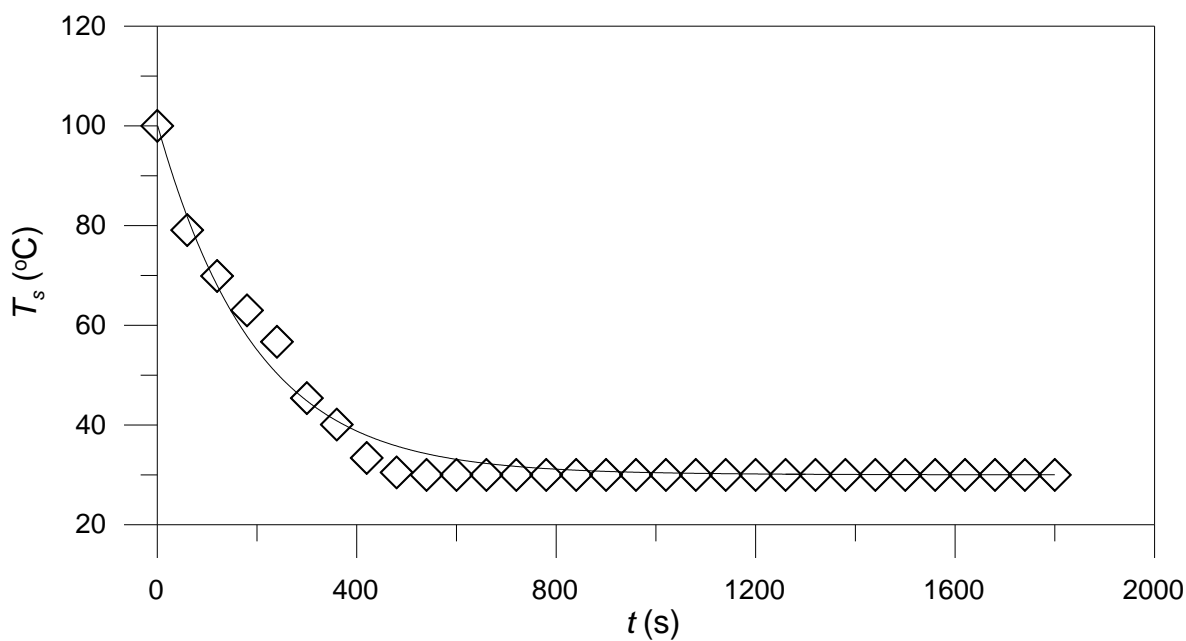


Figura 4.2. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leito de soja com M_{in} igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 30°C.

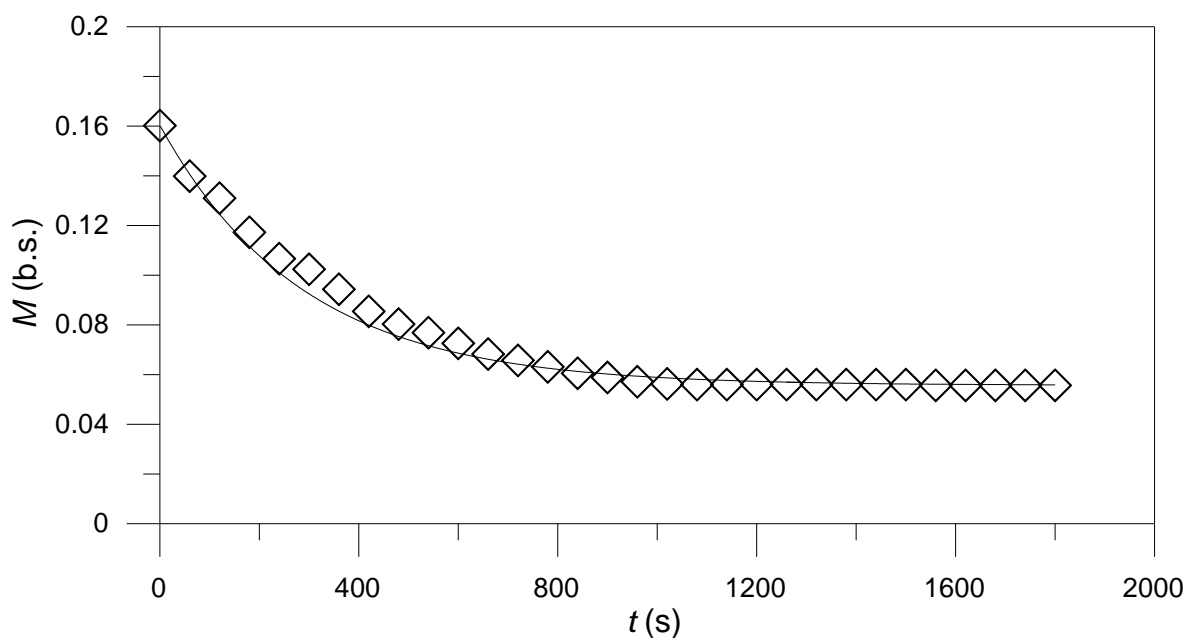


Figura 4.3. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leite soja alimentado a 100 °C em um secador batelada operando a 40 °C.

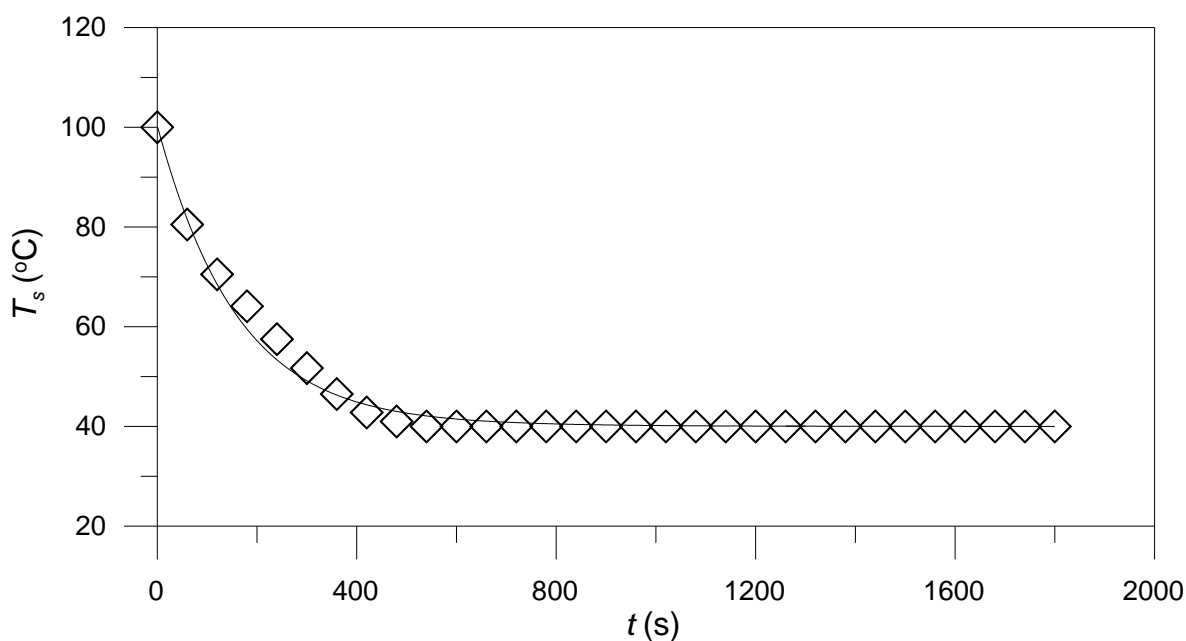


Figura 4.4. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leite de soja extrusado com M_{in} igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 40 °C.

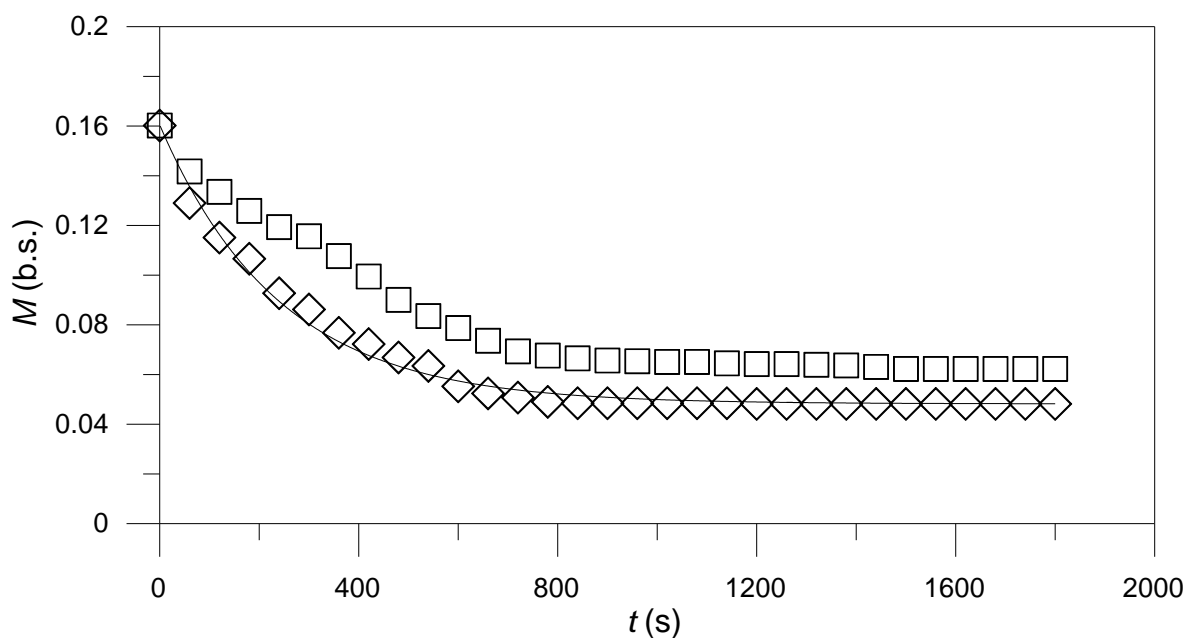


Figura 4.5. Resultados experimentais (símbolos) e calculados (linhas) de umidade de soja extrusada alimentada a 100 °C em um secador batelada operando a 30 °C (quadrados) e 50 °C (losangos e linha sólida).

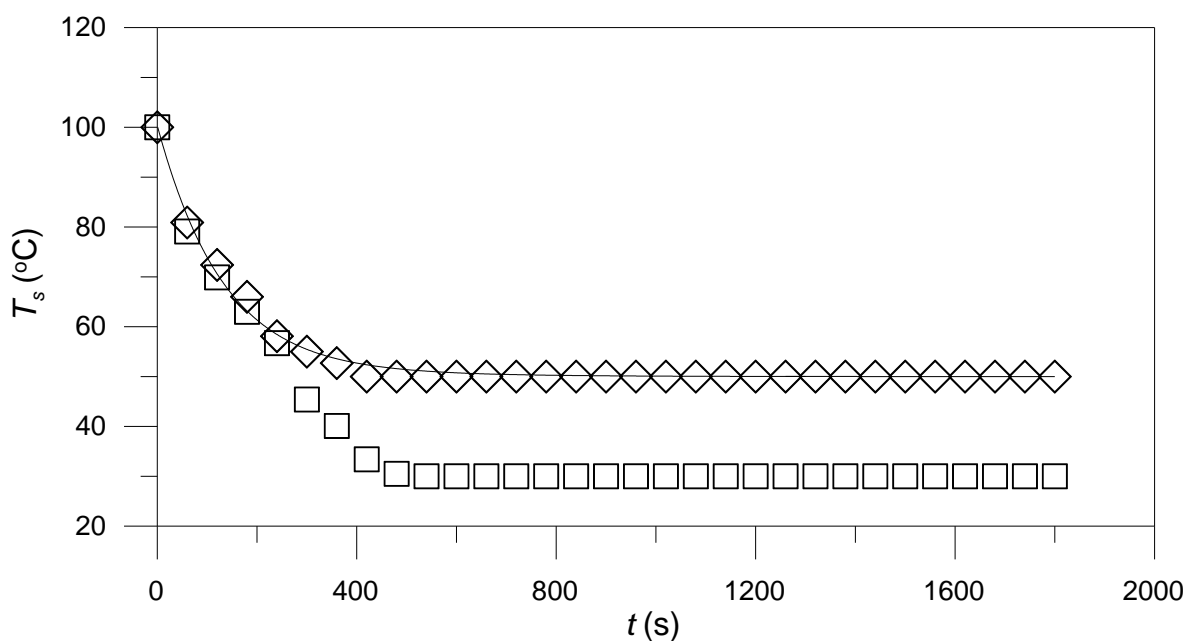


Figura 4.6. Resultados experimentais (símbolos) e calculados (linhas) de temperatura de soja extrusada com umidade inicial de 0,16 (b.s.) em um secador batelada operando a 30 °C (quadrados) e 50 °C (losangos e linha sólida).

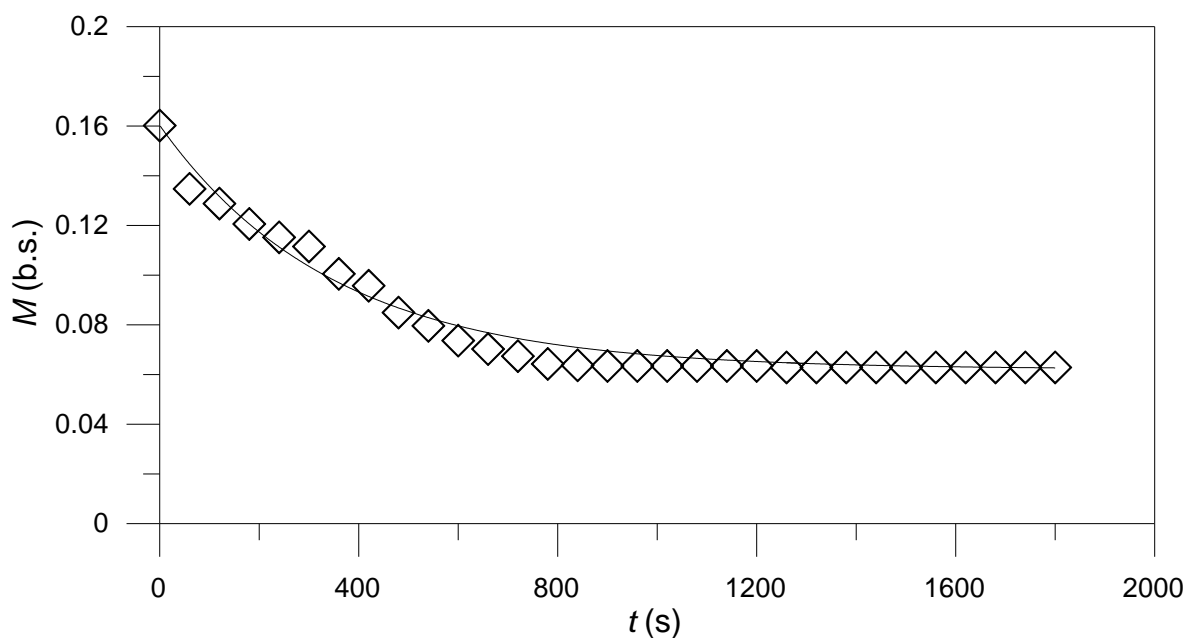


Figura 4.7. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leite soja alimentado a 95 °C em um secador batelada operando a 30 °C.

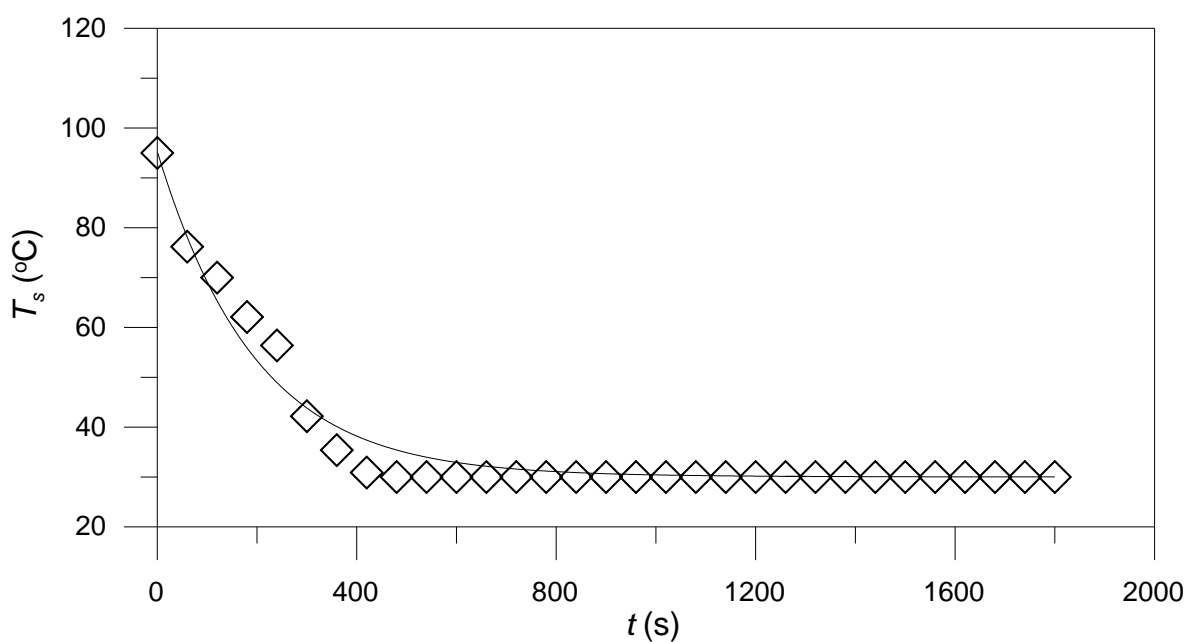


Figura 4.8. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leite de soja extrusada com Min igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 30 °C.

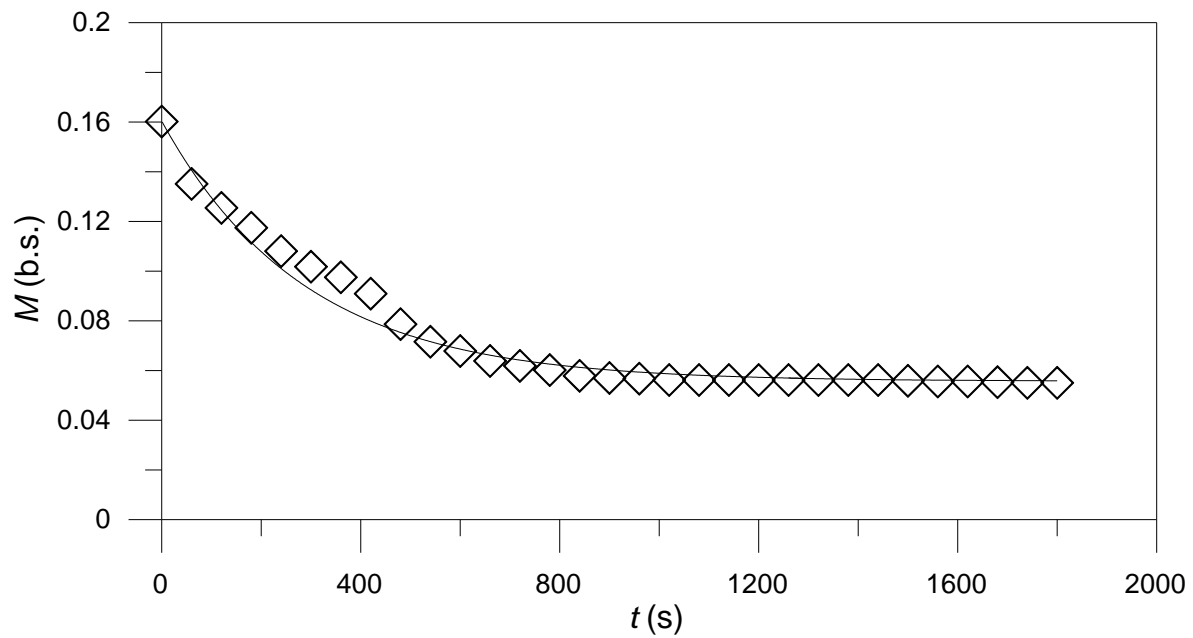


Figura 4.9. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leito soja alimentado a 95 °C em um secador batelada operando a 40 °C.

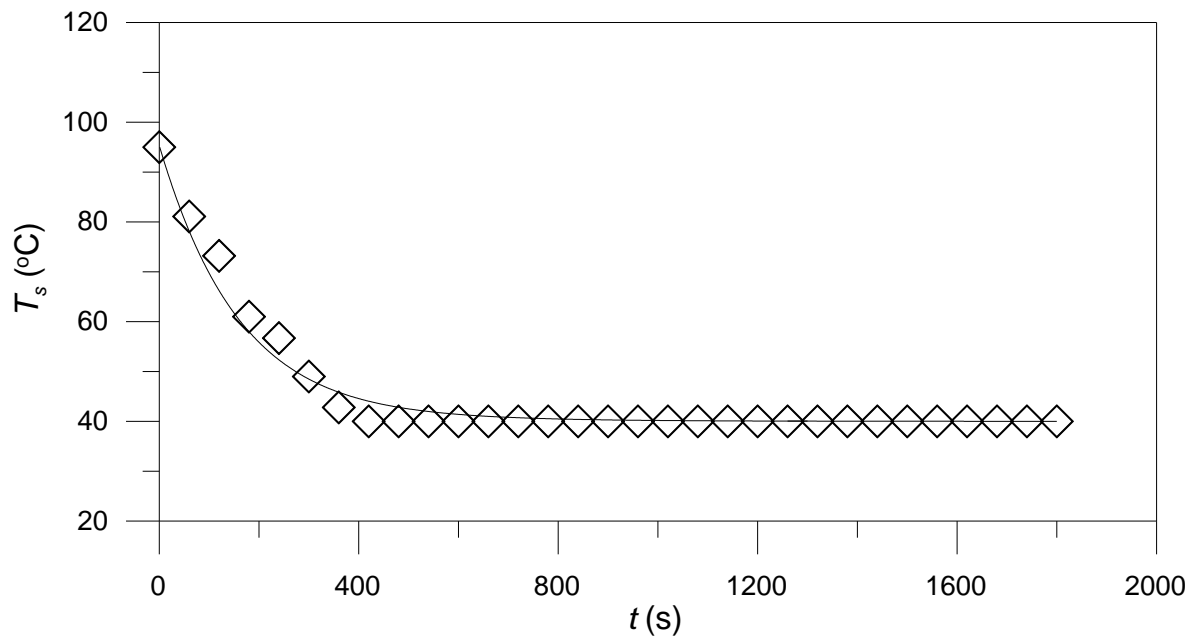


Figura 4.10. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leito de soja extrusada com umidade inicial igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 40 °C.

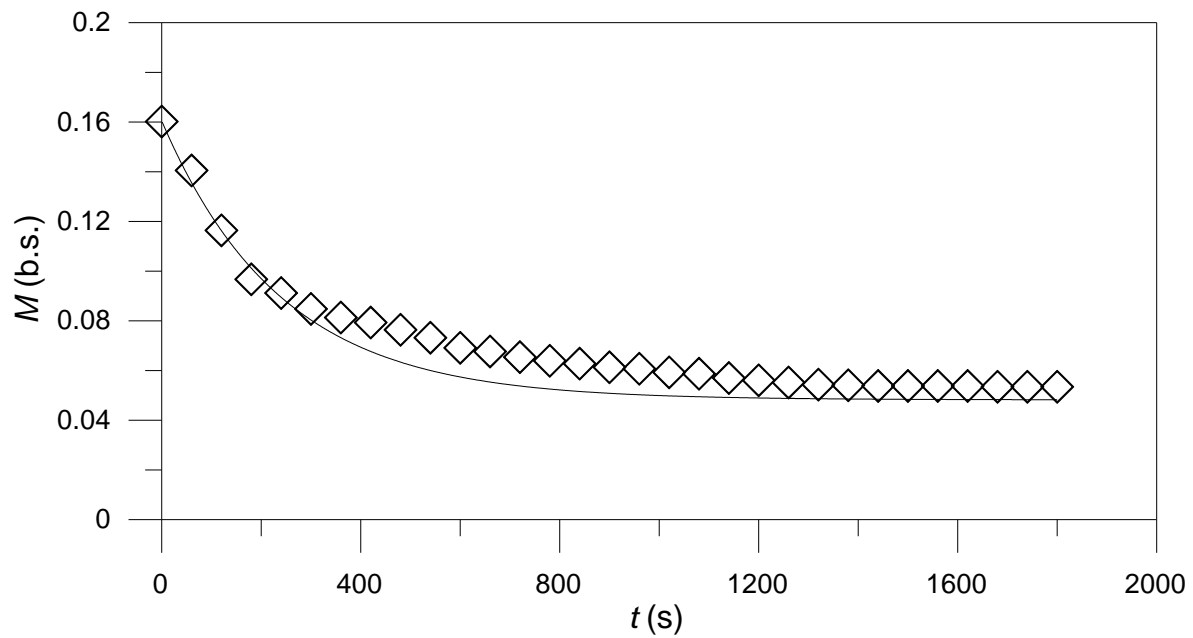


Figura 4.11. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade do leito soja alimentado a 95 °C em um secador batelada operando a 50 °C.

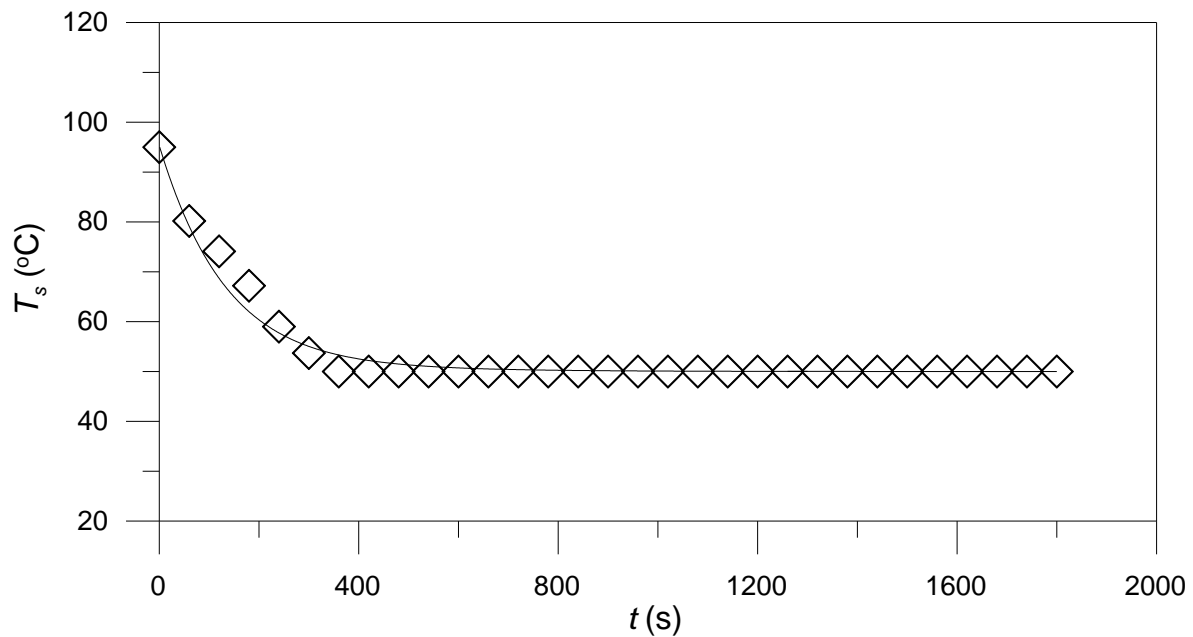


Figura 4.12. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de temperatura do leito de soja extrusada com umidade inicial igual a 0,16 b.s. em um secador batelada operando a 50 °C.

Nas simulações realizadas para reproduzir os resultados no secador de laboratório foram utilizadas umidades relativas iguais a 34,7, 31 e 25,6 %, determinadas experimentalmente como mencionado na seção 3.1.2, a fim de estimar as umidades de equilíbrio com a Equação (2.4) a 30, 40 e 50 °C, respectivamente. Os coeficientes de transporte de massa e calor ajustados por metodologia reportada na seção 3.2 e utilizados com este mesmo propósito são reportados nas Figura 4.13 e 4.14.

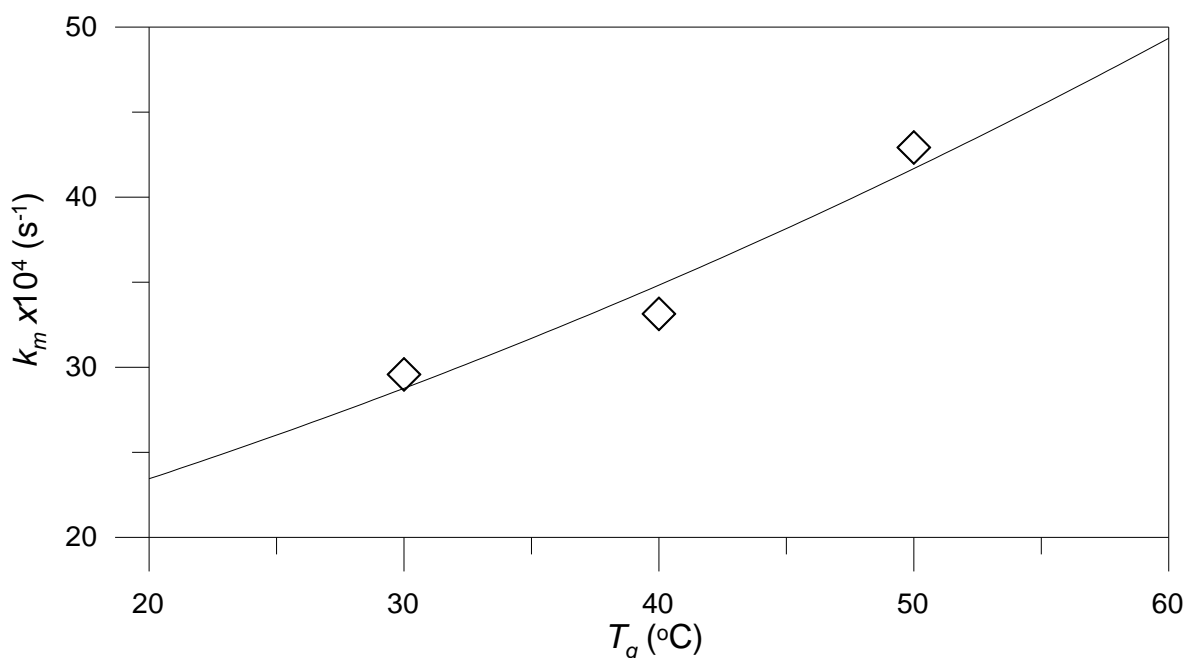


Figura 4.13. Efeito da temperatura sobre o coeficiente efetivo de transporte de massa. Símbolos: resultados ajustados a partir de ensaios de secagem em secador batelada; linha sólida: Equação (4.1).

Em ambas as Figuras 4.13 e 4.14 evidencia-se o clássico incremento exponencial dos coeficientes devido ao aumento da temperatura de secagem. Por consequência, correlações do tipo Arrhenius entre a variável dependente e independente em questão foram propostas para ambos os coeficientes efetivos. O bom acordo ($R^2=0.95$) entre resultados ajustados de k_m e obtidos pela aplicação da Equação (4.1) é evidente na Figura 4.13.

$$k_m = 1,149 \exp\left(\frac{-1815}{T_g + 273}\right) \quad (4.1)$$

De forma análoga ao parâmetro de transporte de massa, observa-se na Figura 4.14 que os coeficientes de transporte de calor estimados com a Equação (4.2) nas diferentes temperaturas reproduzem corretamente os valores ajustados ($R^2=0.97$).

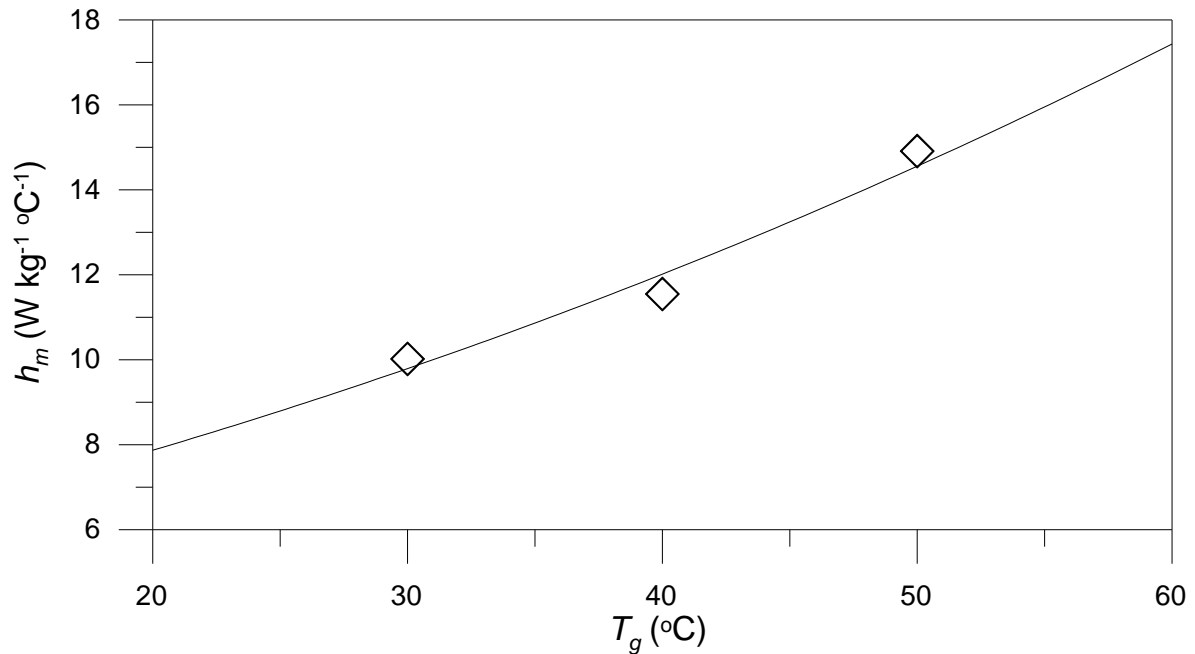


Figura 4.14. Efeito da temperatura sobre o coeficiente efetivo de transporte de calor. Símbolos: resultados ajustados a partir de ensaios de secagem em secador batelada; linha sólida: Equação (4.2).

$$h_m = 5,909 \times 10^3 \exp\left(\frac{-1940}{T_g + 273}\right) \quad (4.2)$$

O calor específico do sólido seco requerido para solução do modelo, foi obtido da Tabela 2.5. Em particular, foi utilizado um valor igual a 1444 J kg⁻¹ °C⁻¹ (DESHPANDE e BAL, 1999), porém simulações com os diferentes valores de Cp_{ss}

disponíveis na mencionada tabela apresentaram resultados similares. O calor específico da água líquida é aproximadamente igual a $4185 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, enquanto a mesma propriedade para o vapor d'água foi determinada com um polinômio de 3° com coeficientes ajustados para reproduzir dados experimentais da mesma propriedade na faixa de -20 a $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (HOLMAN, 1983).

O comportamento dinâmico do leito de soja extrusada na entrada e saída do secador industrial de esteira detalhado na secção 3.1.3 é reportado nas Figuras 4.15 e 4.16. Com exceção de variações temporais de umidade e temperatura na alimentação, as quais são reportadas nas citadas figuras, não foram consideradas alterações nas condições de operação. Em essência, significa dizer que durante o intervalo de processamento investigado propriedades médias do gás foram consideradas, o que caracteriza o regime como pseudo-estacionário.

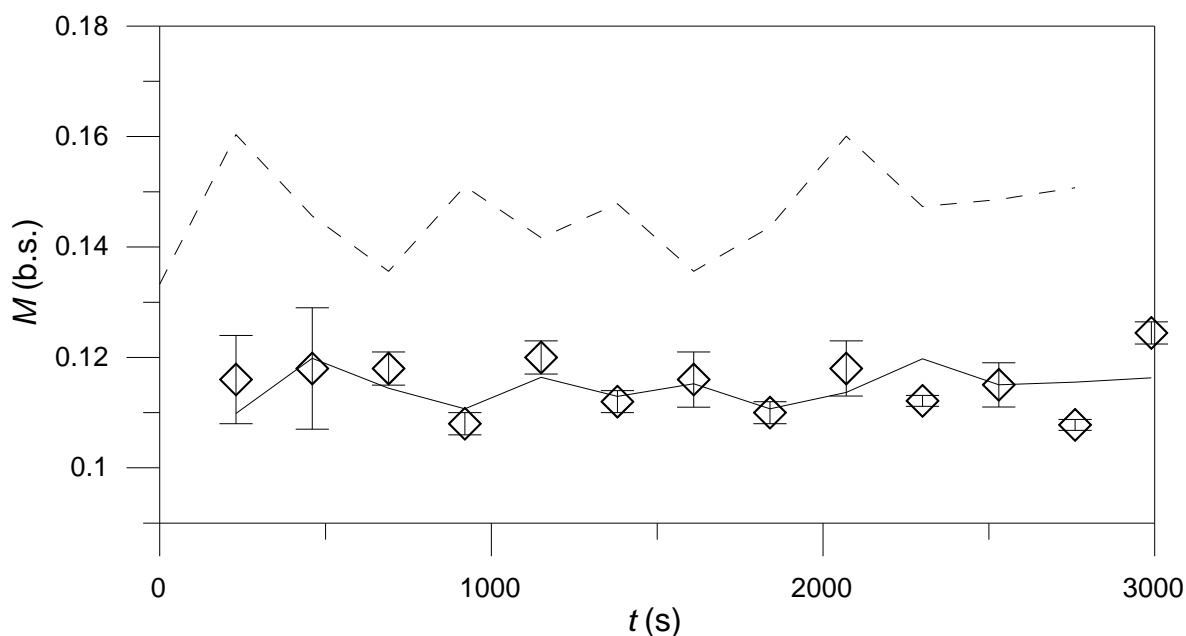


Figura 4.15. Comportamento dinâmico da umidade de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: ar de secagem e resfriamento a uma temperatura e umidade absoluta médias de $53 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,0685 \text{ kg kg}^{-1}$, respectivamente. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8).

Neste ponto cabe mencionar que o intervalo de tempo entre as medidas de umidade na alimentação e descarga se mantém constante ao longo dos 3000 s de operação por que a velocidade da esteira transportadora ($u_c = C/\tau = 14,4/230 = 0,0626 \text{ m s}^{-1}$) não foi modificada. Ainda há de se destacar, que as variações de umidade na descarga não são linearmente proporcionais as variações da mesma propriedade na alimentação por que se tratam de medidas em diferentes tempos de processamento, cujo efeito sobre a variável de interesse é de redução aproximadamente exponencial.

Um primeiro aspecto que deve ser observado na Figura 4.15 é que os valores de umidade na descarga estão defasados de 230 s (tempo de residência) em relação as medidas experimentais da mesma variável na alimentação. É importante que se destaque este fato a fim de que se perceba a clara correlação entre as perturbações na condição de alimentação e o comportamento na descarga. Por exemplo, observa-se que logo após a primeira medida de umidade na alimentação, o material entrou consideravelmente mais úmido, mas nas duas medidas subseqüentes a umidade decaiu. O efeito destas perturbações começou a ser identificado na descarga somente após 230 s da alimentação, porém observa-se que imediatamente após esta primeira medida na saída do equipamento, também ocorreu uma variação positiva, seguida por duas quedas consecutivas de umidade. Em resumo, observa-se nitidamente que se a umidade sobe na alimentação, após 230 s de operação registrar-se-á um incremento desta mesma propriedade na descarga, enquanto que uma queda em M_i deve provocar uma redução da umidade do produto na saída do secador-resfriador.

Resultados análogos aos encontrados na Figura 4.15, porém reportando dados de temperatura do leito nos extremos do equipamento são apresentados na Figura 4.16. Também neste caso a relação entre as perturbações na alimentação e a variação de temperatura na descarga é facilmente estabelecida e segue o mesmo padrão causa-efeito mencionado para umidade. Entretanto, as oscilações de temperatura na descarga são aparentemente mais tênues do que as encontradas para a umidade do produto na Figura 4.15. A causa deste comportamento pode ser apenas aparente visto que a diferença relativa entre as

mesmas propriedades médias na alimentação e descarga é muito maior no caso da temperatura (ver Equação 4.3), o que faz com que as variações na descarga fiquem achatadas pois os perfis temporais na alimentação e descarga são reportados no mesmo gráfico (Figura 4.15).

$$\frac{\bar{T}_{si} - \bar{T}_{so}}{\bar{T}_{si}} \approx 2 \times \frac{M_i - M_o}{M_i} \quad (4.3)$$

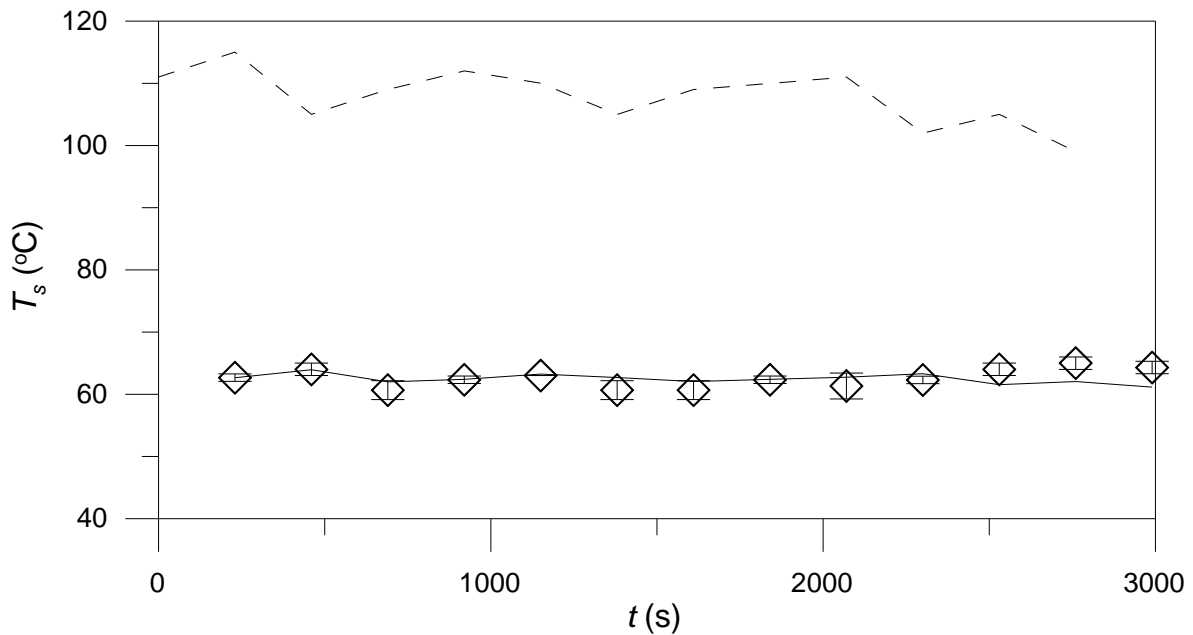


Figura 4.16. Comportamento dinâmico da temperatura de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: ar de secagem e resfriamento a uma temperatura e umidade absoluta médias de 53 °C e 0,0685 kg kg⁻¹, respectivamente. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8).

Uma explicação fenomenológica para esta menor sensibilidade da temperatura na descarga frente a perturbações na alimentação poderia ser simplesmente uma menor oscilação da temperatura do que da umidade na alimentação.

Entretanto, a razão entre o desvio padrão das diferentes medidas de temperatura na alimentação é da mesma ordem de grandeza da propriedade análoga para a umidade. Em resumo, em ambos os casos observam-se variações de 4 a 6 % em relação aos respectivos valores médio da propriedade, ou então, de forma mais simples, as perturbações em T_{si} não são significativamente menores do que às em M_i .

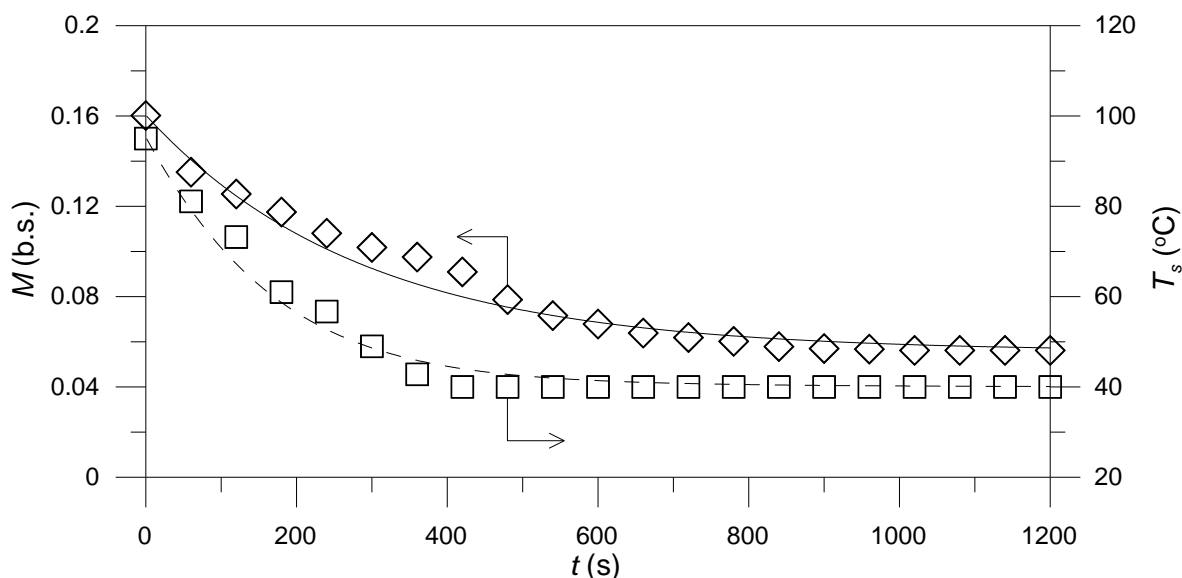


Figura 4.17. Variação experimental (símbolos) e calculada (linha) de umidade (losangos e linha sólida) e temperatura (quadrados e linha tracejada) do leito de soja extrusada em um secador-resfriador batelada operando a 40 °C.

Como última alternativa, a origem deste peculiar comportamento pode ser atribuída às diferenças entre a cinética de secagem e resfriamento. A Figura 4.17 apresenta uma comparação entre os resultados de temperatura e umidade, anteriormente reportados mas em distintos diagramas, obtidos nos ensaios de laboratório nas temperaturas iniciais e de secagem de 95 e 40 °C, respectivamente. Os resultados evidenciam claramente que a transferência de calor é um fenômeno mais rápido do que a transferência de massa nas presentes condições. Observa-se que a temperatura de equilíbrio é atingida em apenas aproximadamente 500 s, enquanto que a umidade continua a variar por mais do que o dobro deste intervalo.

Este fato explica por que a umidade sente de forma mais marcada do que a temperatura as perturbações nas propriedades do leito na alimentação. De forma complementar, pode-se também afirmar que a temperatura na descarga é muito mais dependente das propriedades do gás, as quais condicionam o equilíbrio, e no caso das Figuras 4.15 e 4.16 são aproximadamente constantes, do que a umidade do produto na mesma posição.

Retornando as Figuras 4.15 e 4.16, imediatamente observa-se que as diferenças entre os valores experimentais e calculados com o modelo proposto são desprezíveis. Apesar de não ser um resultado conclusivo, este bom acordo demonstra o potencial do modelo como ferramenta de simulação do processo sob investigação. Um fato positivo que merece consideração, pois é causa de grande simplificação no equacionamento, é que o modelo conseguiu reproduzir o comportamento dinâmico no secador-resfriador assumindo valores médios das propriedades do gás de secagem. Esta evidência é motivo de grande reflexão pois na secção 3.1.3, onde o equipamento industrial é detalhadamente descrito, observa-se que na direção longitudinal o equipamento é essencialmente dividido em três compartimentos sob condições de temperatura e umidade do gás de secagem certamente diferentes. Não bastassem os perfis longitudinais (direção x), existem também fortes indícios de variação das propriedades do gás ao longo da espessura (direção y), visto que o leito apresenta 0,5 m de altura. Em resumo, é positivamente surpreendente que apesar das prováveis variações bidimensionais e temporais (devido as perturbações na condição de alimentação) das propriedades do ar, o modelo ainda reproduza corretamente os resultados experimentais dos ensaios no equipamento industrial com um par constante de umidade e temperatura iguais a 53 °C e 0,0685 kg kg⁻¹, respectivamente. Neste momento é importante que se mencione que os valores citados foram ajustados de forma a reproduzir o conjunto de dados reportados na Figura 4.15 e 4.16. Novamente, o método Simplex de otimização (JENSON e JEFFREYS, 1977), porém envolvendo a função objetivo definida pela Equações (4.4) foi empregado.

$$f = \sum_{j=1}^{JK} \left| M_{calc.}^j - M_{exp.}^j \right| \times \left| T_{s calc.}^j - T_{s exp.}^j \right| \quad (4.4)$$

Devido a experiência prática e familiaridade do autor com o presente processo, sabe-se que os valores de temperatura e umidade encontrados por aplicação do procedimento de ajuste estão na faixa esperada para estas variáveis.

Todavia, medidas experimentais das propriedades do gás não foram realizadas durante estes primeiros ensaios no secador-resfriador industrial, de modo que esta afirmação não pode ser confirmada. Neste contexto, medidas ulteriores de umidade e temperatura do sólido foram conduzidas de forma a gerar resultados análogos aos reportados nas Figuras 4.15 e 4.16, porém nesta ocasião foram registrados simultaneamente, e em intervalos de 920 s, as propriedades do gás na base e no topo do secador, os quais são resumidamente reportados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Propriedades do gás de secagem nos ensaios que conduziram ao comportamento dinâmico observado nas Figuras 4.18 e 4.19

t (s)	Compartimento	Temperatura (°C)		UR (decimal)	
		Base	Topo	base	topo
0-920	1	46,8	89,8	0,696	0,639
	2	17,6	73,8	0,680	0,697
	3	17,6	46,8	0,680	0,696
920-1840	1	47	90,3	0,738	0,639
	2	17,1	72,8	0,825	0,669
	3	17,1	47	0,825	0,738
1840-2760	1	46,8	89,8	0,694	0,638
	2	19,3	73,8	0,680	0,695
	3	19,3	46,8	0,680	0,694
2760-3680	1	47,8	89,3	0,702	0,667
	2	19	70	0,7	0,685
	3	19	47,8	0,7	0,702

Convém mencionar que as medidas que aparecem separadas de 920 s na Tabela 4.1 na verdade são separadas de dias de operação. Ainda que para os propósitos de validação do modelo dinâmico este fato não apresenta relevância, esta observação necessita ser destacada por que um leitor atento perceberia que a temperatura ambiente varia de aproximadamente 2 °C (17,1 para 19,3 °C) em apenas poucos segundos. Apesar da região metropolitana de Curitiba ser caracterizada por grandes oscilações climáticas é menos do que pouco provável que este fenômeno possa ser realmente registrado. As mesmas tendências identificadas nas Figuras 4.15 e 4.16 são novamente observadas nas Figuras 4.18 e 4.19, ou seja: *i)* as variações de umidade e temperatura na descarga são proporcionais as perturbações nas respectivas variáveis na alimentação, porém não linearmente dependentes; *ii)* a temperatura do leito na descarga é menos sensível a perturbações na entrada do que a umidade. Apesar do comportamento análogo reportado no último parágrafo, um fato muito importante distingue as Figuras 4.15 e 4.16 das 4.18 e 4.19. Nas últimas, as soluções numéricas envolvendo o modelo dinâmico foram realizadas com valores médios das propriedades do gás estimados a cada 920 s a partir dos dados experimentais reportados na Tabela 4.1.

Em particular, empregaram-se as Equações (4.5) e (4.6) para estimativas da umidade relativa e temperatura do gás considerando respectivamente uma média aritmética e ponderada das variações na direção y e x nos compartimentos 1 e 2 do secador, os quais são denotados como sobrescritos nas referidas expressões.

$$UR = \frac{1}{3} \left[\frac{UR_{base}^1 + UR_{topo}^1}{2} \right] + \frac{2}{3} \left[\frac{UR_{base}^2 + UR_{topo}^2}{2} \right] \quad (4.5)$$

$$T_g = \frac{1}{3} \left[\frac{T_{gbase}^1 + T_{gtopo}^1}{2} \right] + \frac{2}{3} \left[\frac{T_{gbase}^2 + T_{gtopo}^2}{2} \right] \quad (4.6)$$

A relação entre as umidades relativa e absoluta médias, quando necessário, foi obtida pela Equação (4.7) (CALÇADA et al., 1993), sendo que a pressão de saturação na temperatura média do gás pode ser calculada pela Equação (4.8) (equação de Antoine) (CALÇADA et al., 1993).

$$UR = \frac{692,7}{p_{sat}} \left(\frac{U}{0,625 + U} \right) \quad (4.7)$$

$$p_{sat} = \exp \left\{ 18,3036 - \left[\frac{3816,44}{(T_g + 273,15 - 46,13)} \right] \right\} \quad (4.8)$$

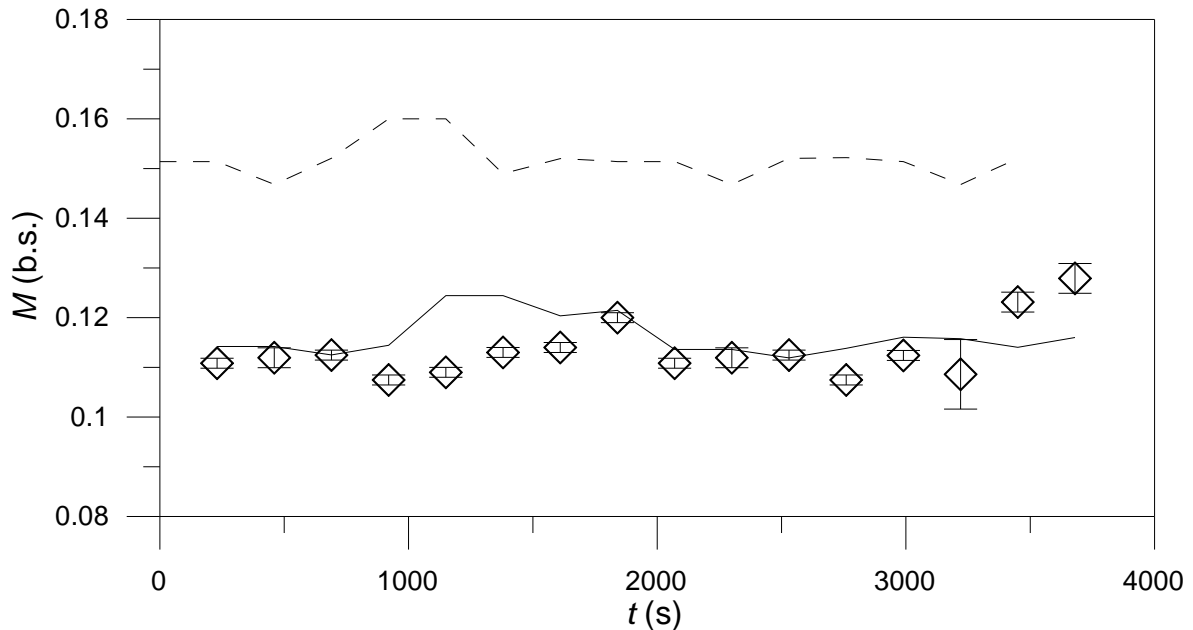


Figura 4.18. Comportamento dinâmico da umidade de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: temperatura e umidade absoluta médias do ar de secagem estimadas a cada 920 s com base em medidas experimentais reportadas na Tabela 4.1 e Equações (4.5) e (4.6). Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8).

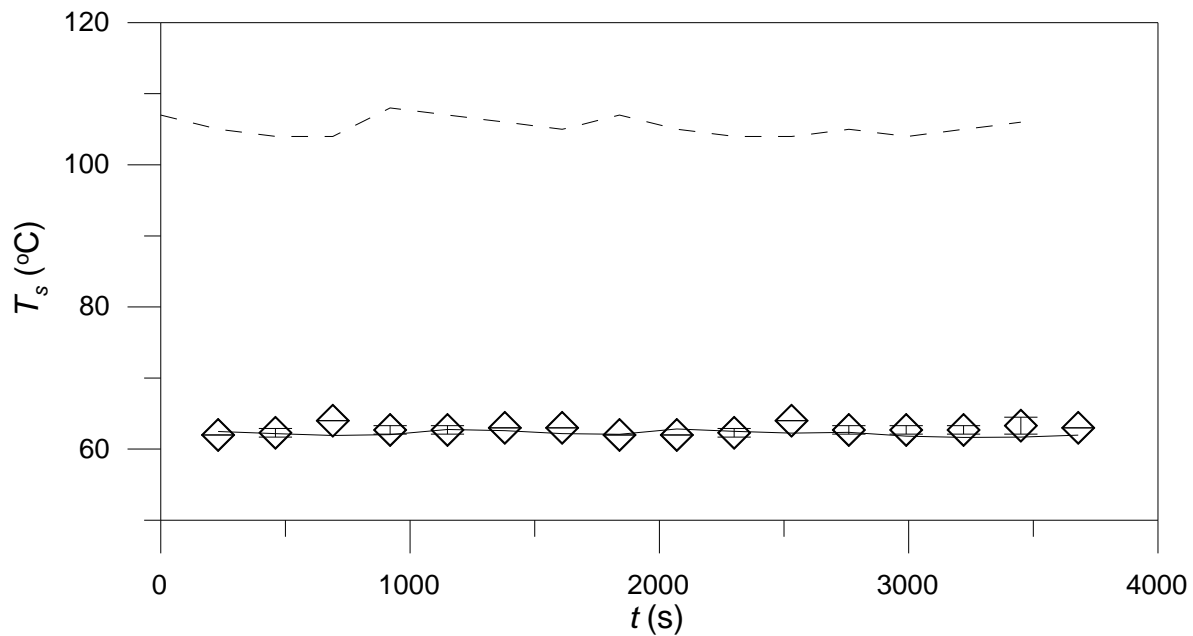


Figura 4.19. Comportamento dinâmico da temperatura de um leito de soja extrusada na entrada (linha tracejada) e saída (linha sólida e símbolos) de um secador industrial de esteira. Condições de operação envolvidas na simulação: temperatura e umidade absoluta médias do ar de secagem estimadas a cada 920 s com base em medidas experimentais reportadas na Tabela 4.1 e Equações (4.5) e (4.6). Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: resultados calculados com as Equações (3.1) e (3.8).

Uma vez confirmada a validade do modelo dinâmico sem ajuste de parâmetros em condições de operação tipicamente empregadas em escala industrial, o mesmo foi empregado como um secador-resfriador virtual a fim de verificar a consistência da estratégia de controle proposta. As perturbações assumidas durante as simulações em malha aberta e fechada são apresentadas nas Figuras 4.20 a 4.23.

Embora todas as perturbações possam ocorrer simultaneamente as simulações foram inicialmente realizadas assumindo que somente a umidade de alimentação, ou a temperatura de alimentação, ou a temperatura média do ar, ou a umidade absoluta média do ar era perturbada. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de verificar o efeito de cada variável no comportamento transiente do processo de secagem e resfriamento investigado.

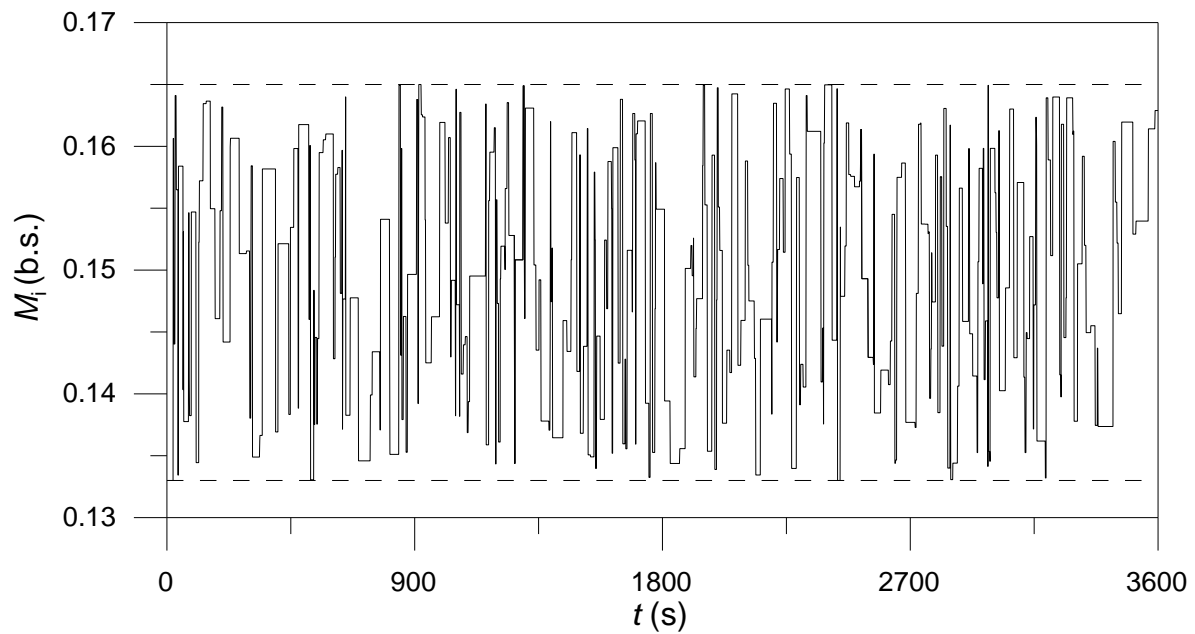


Figura 4.20. Perturbações randômicas na umidade de alimentação do leito de soja extrusada no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações.

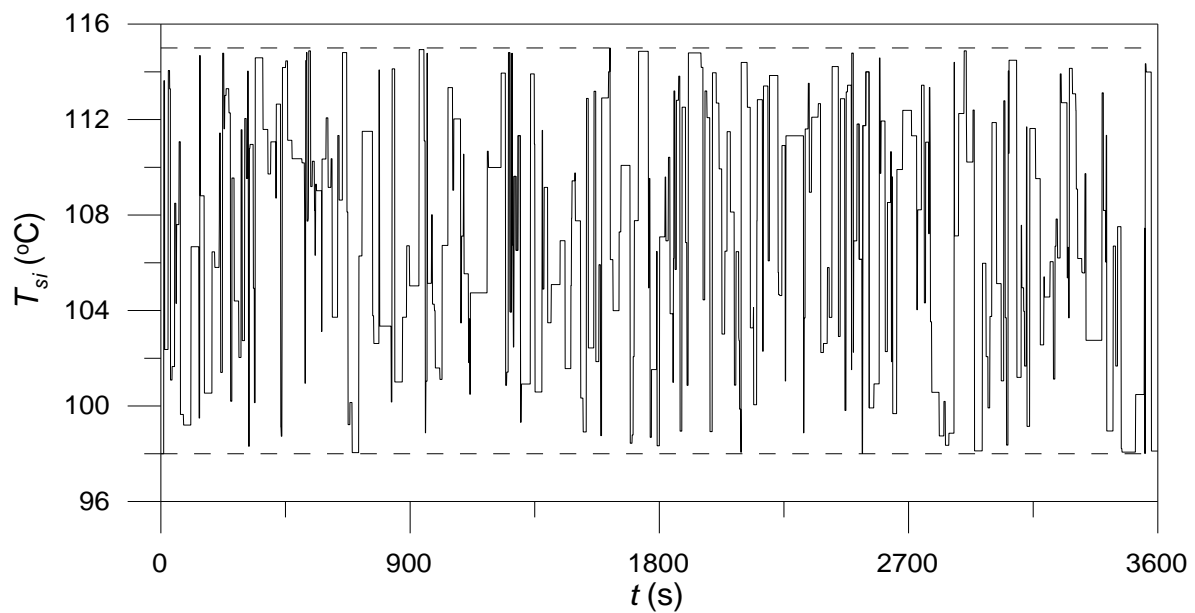


Figura 4.21. Perturbações randômicas na temperatura de alimentação do leito de soja extrusada no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações.

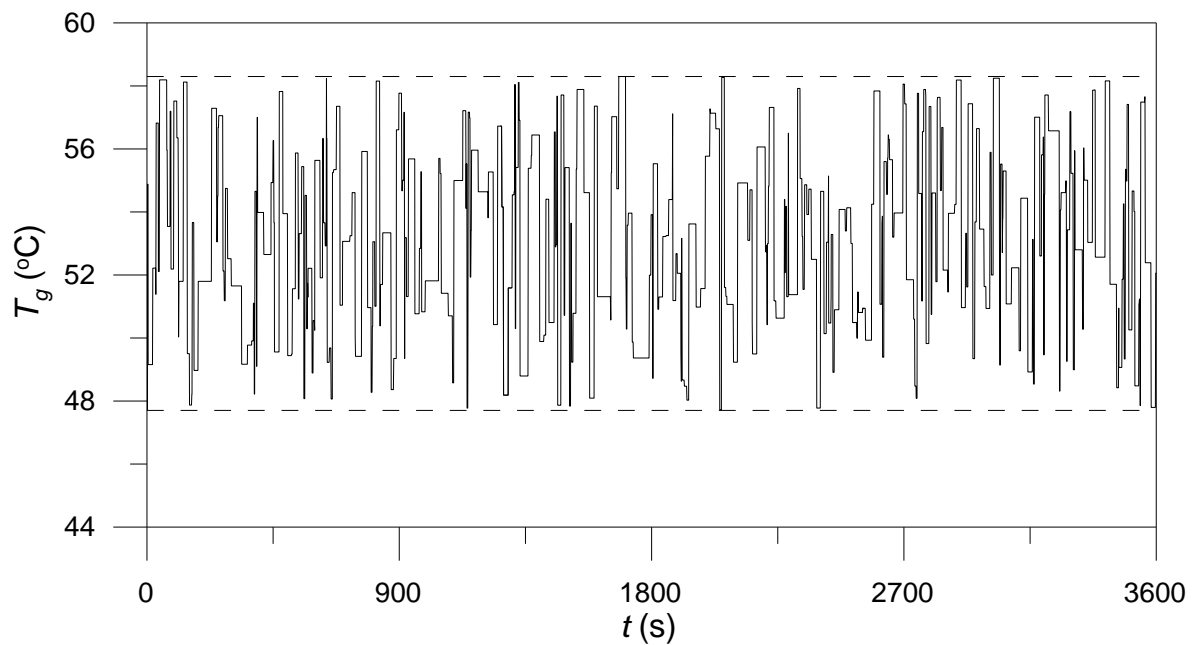


Figura 4.22. Perturbações randômicas na temperatura média do ar no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações.

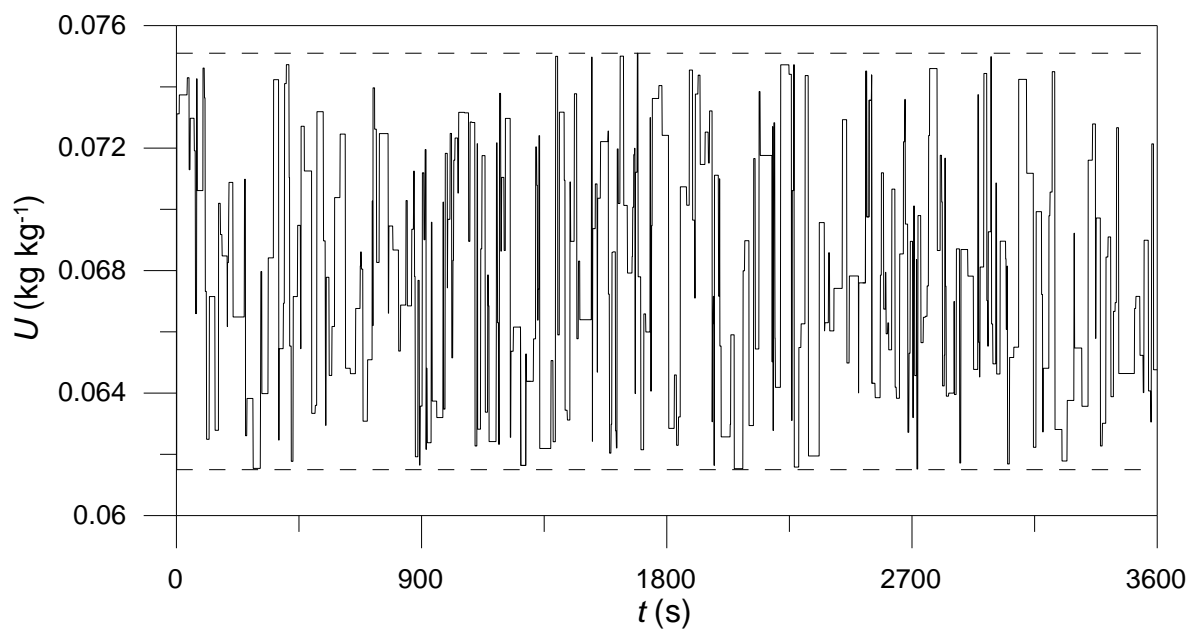


Figura 4.23. Perturbações randômicas na umidade absoluta média do ar no secador-resfriador. Linhas tracejadas: limites impostos as variações.

As Figuras 4.24 a 4.26, 4.27 a 4.29, 4.30 a 4.32 e 4.33 a 4.35 apresentam a velocidade da esteira em malha fechada, a umidade de descarga do leito e a

temperatura na saída do secador-resfriador perante as perturbações evidenciadas nas Figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23, respectivamente.

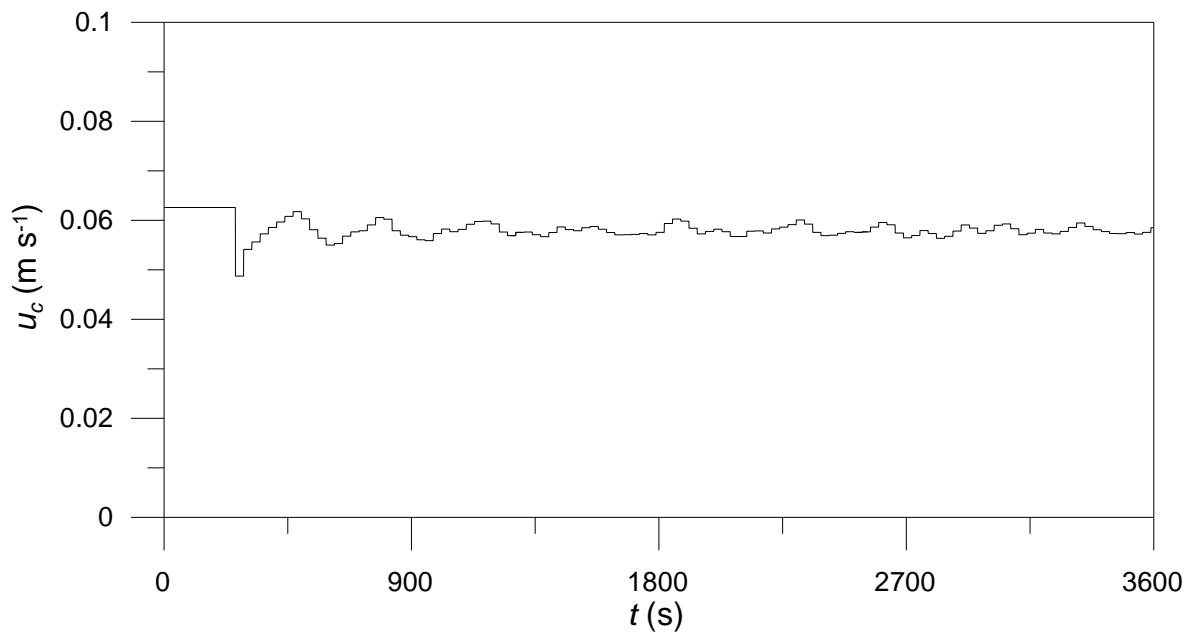


Figura 4.24. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações em M_i reportadas na Figura 4.20.

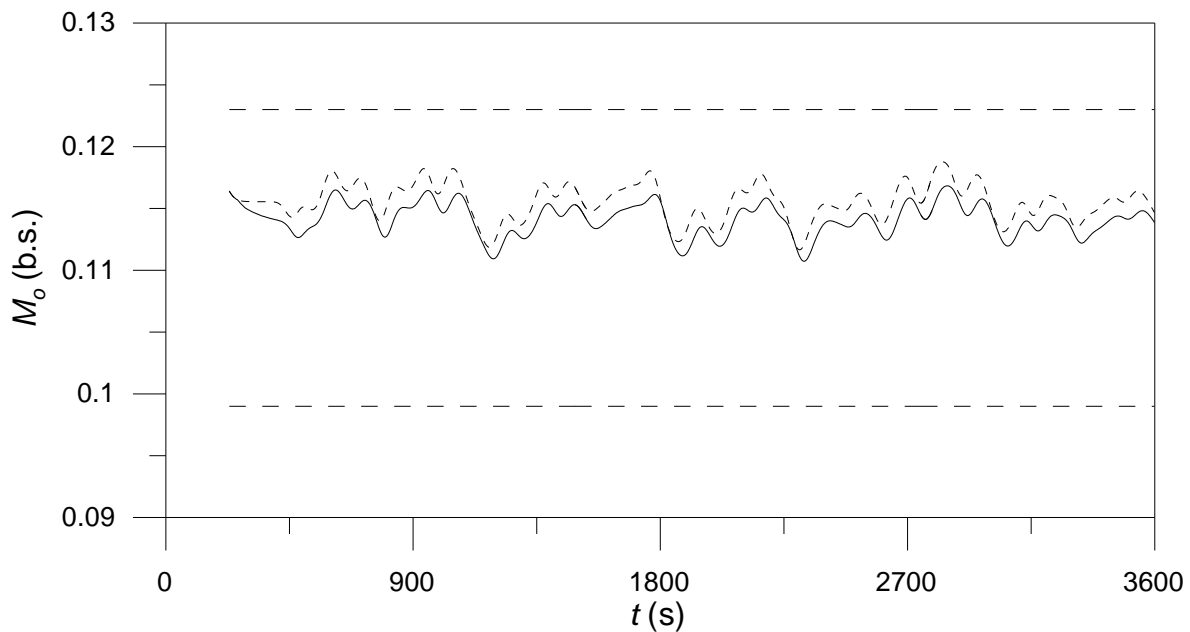


Figura 4.25. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.24. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.

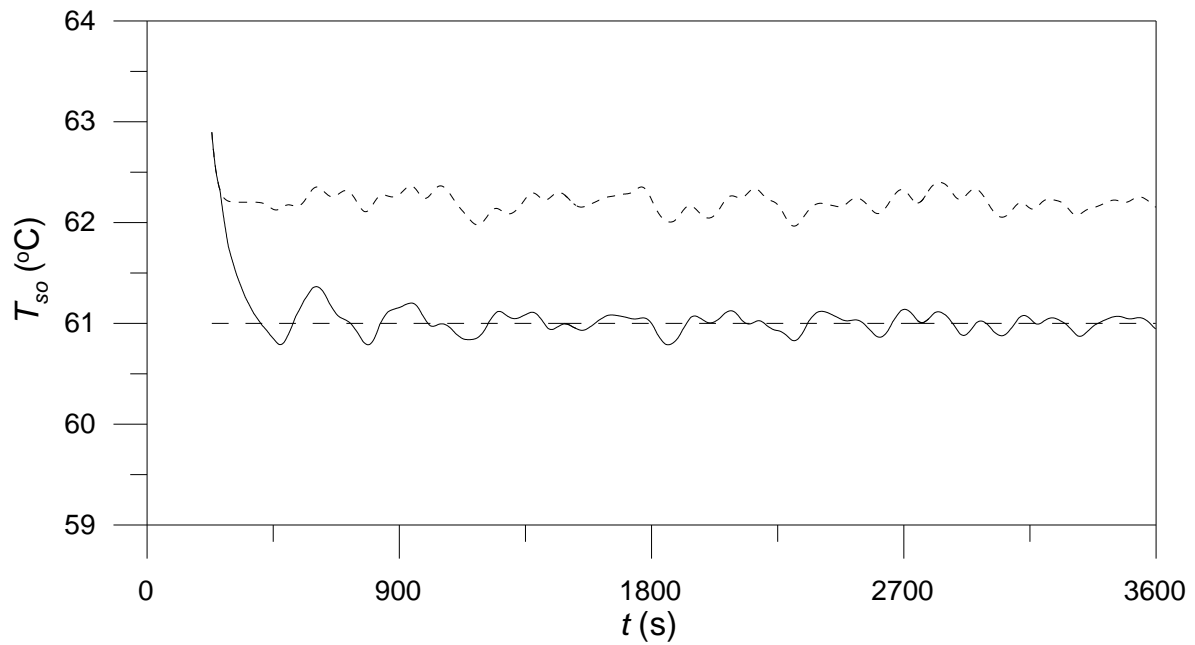


Figura 4.26. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.24. Linha com traços longos: *set-point*.

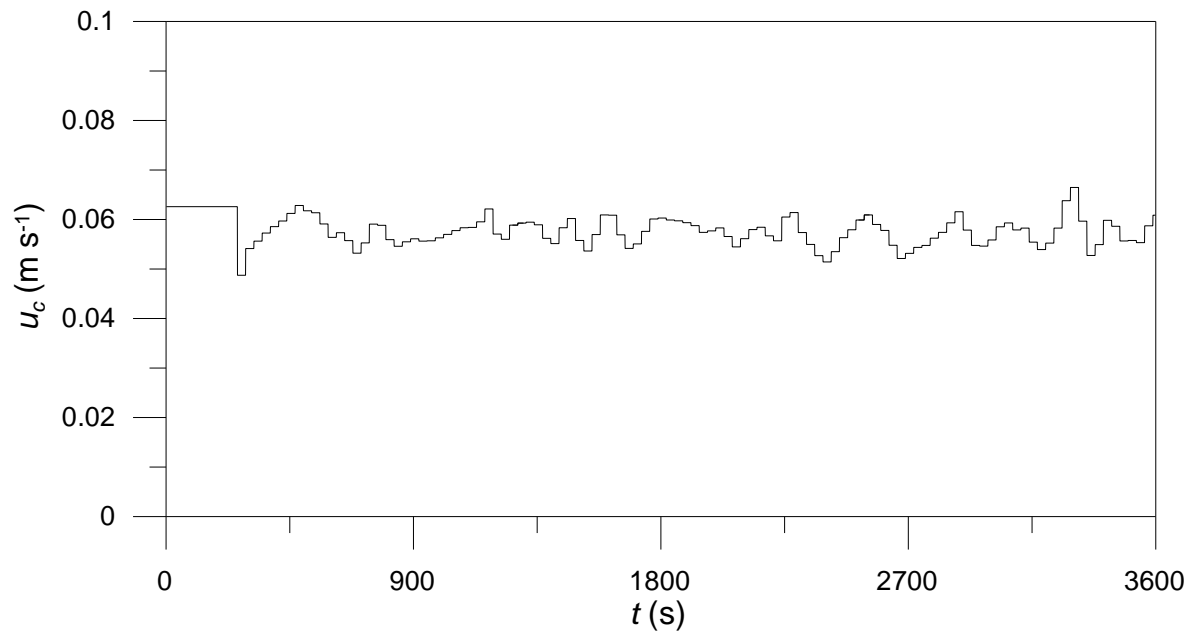


Figura 4.27. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações em T_{si} reportadas na Figura 4.21.

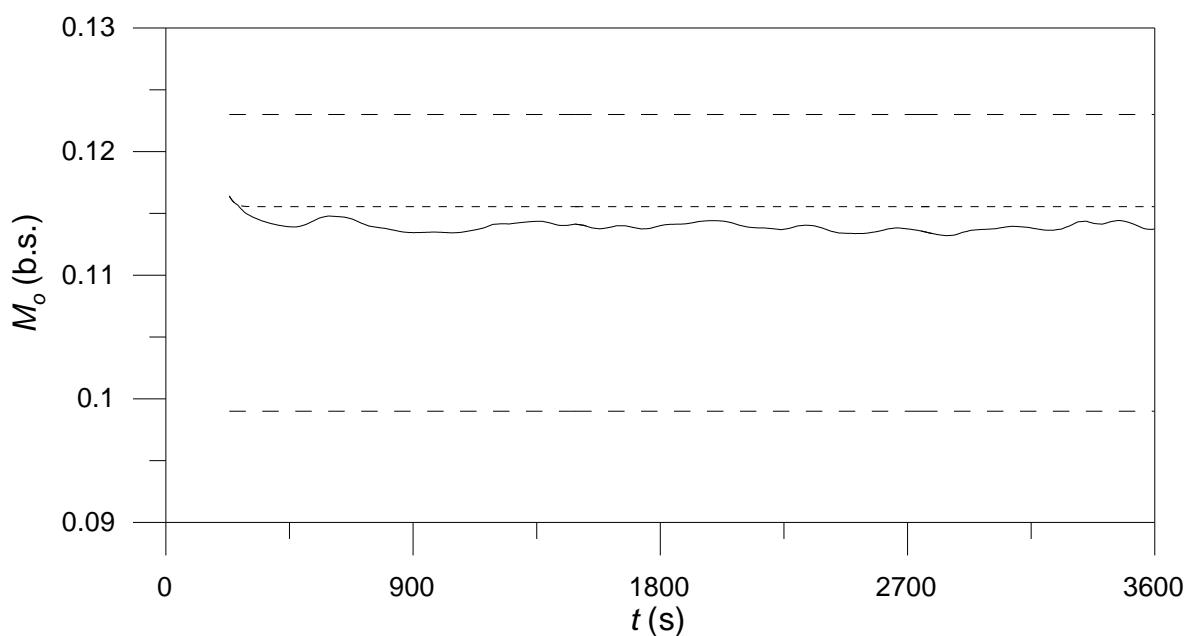


Figura 4.28. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.27. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.

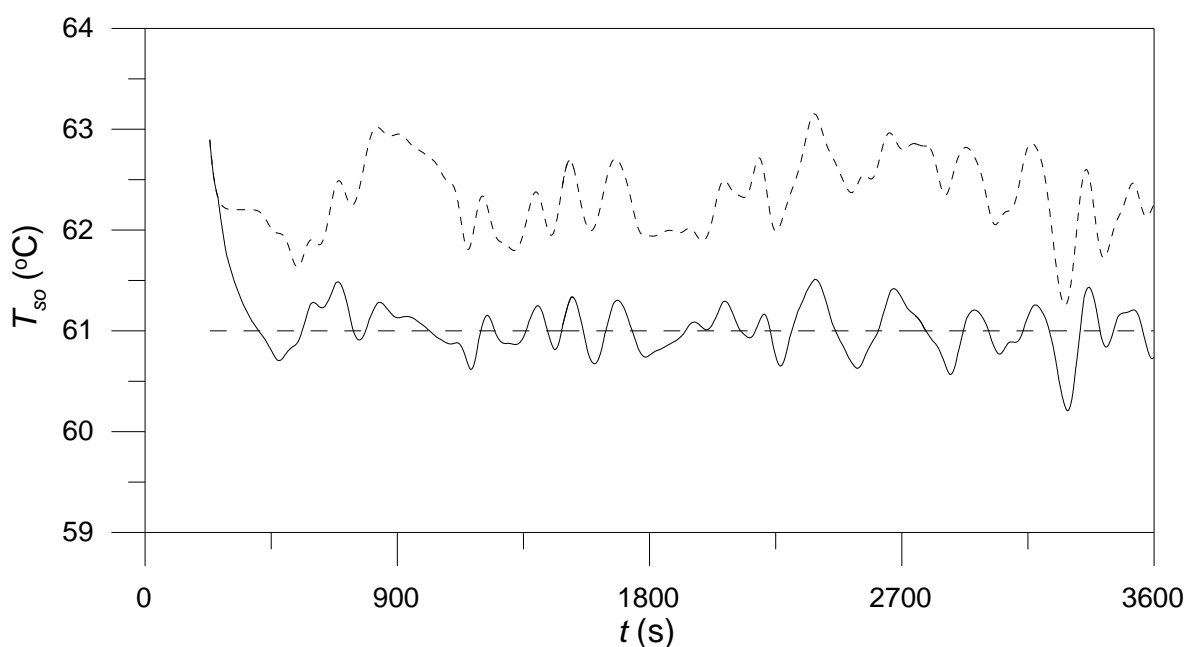


Figura 4.29. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.27. Linha com traços longos: *set-point*.

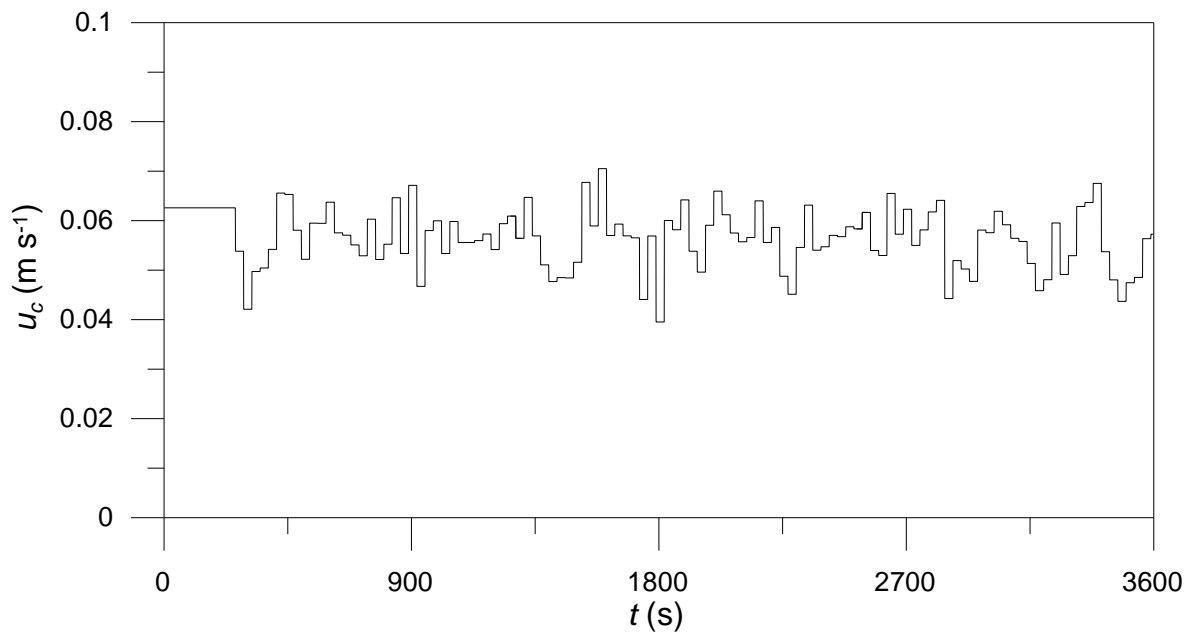


Figura 4.30. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações em T_g reportadas na Figura 4.22.

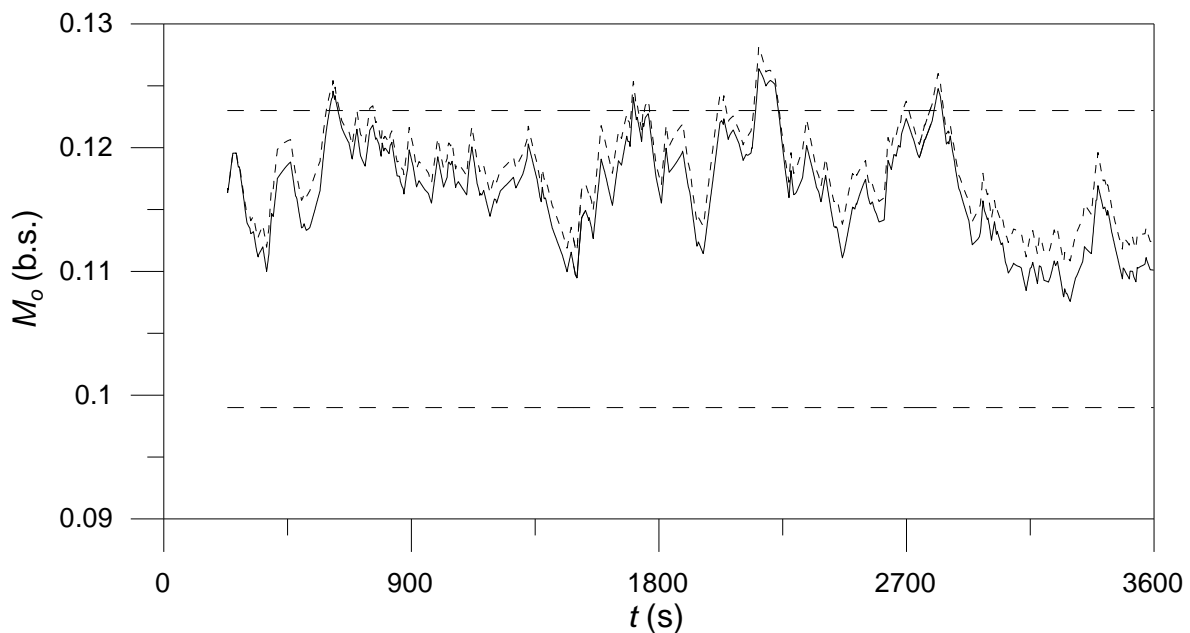


Figura 4.31. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.30. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.

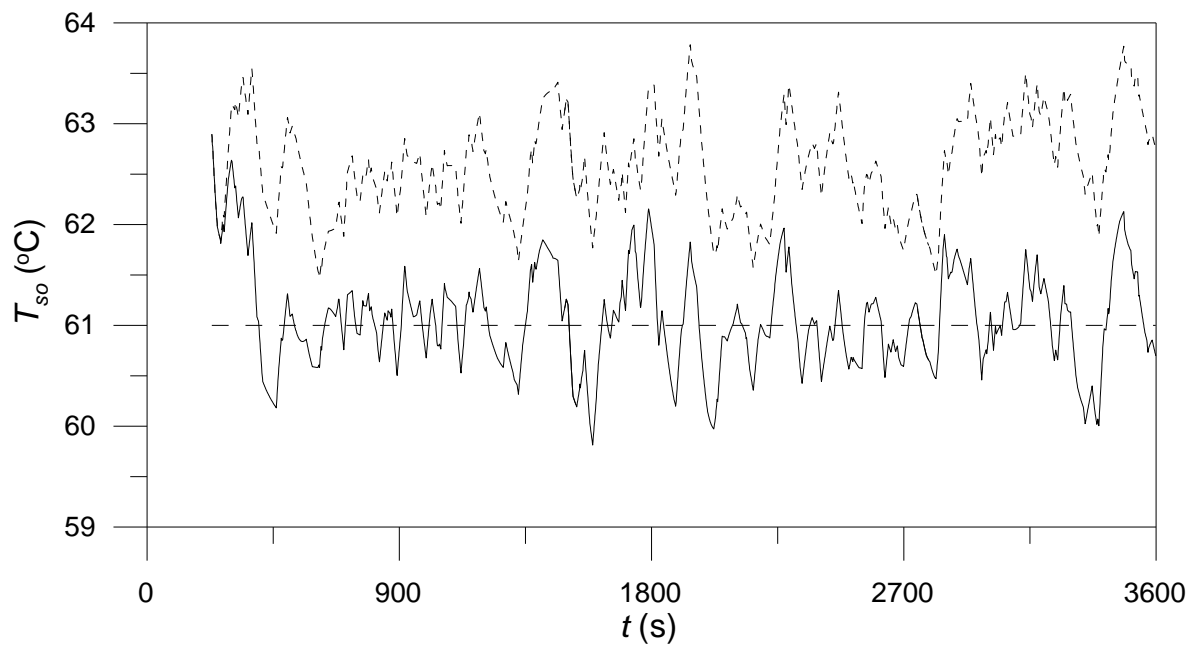


Figura 4.32. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.30. Linha com traços longos: *set-point*.

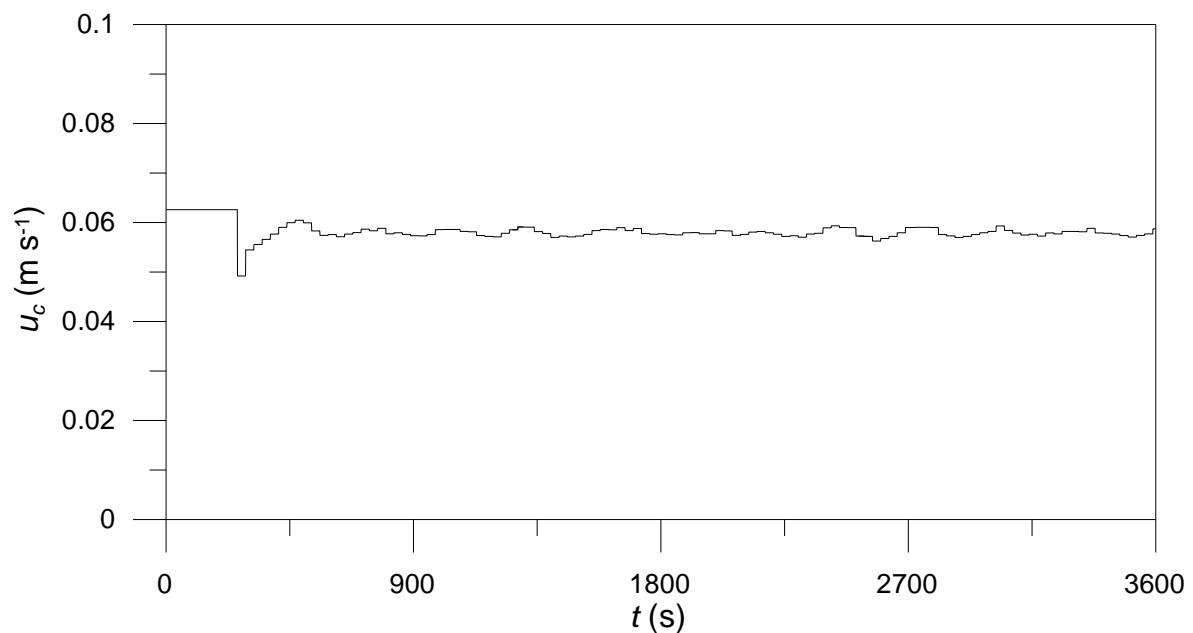


Figura 4.33. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador em intervalos de 30 s e perturbações na umidade absoluta do ar reportadas na Figura 4.23.

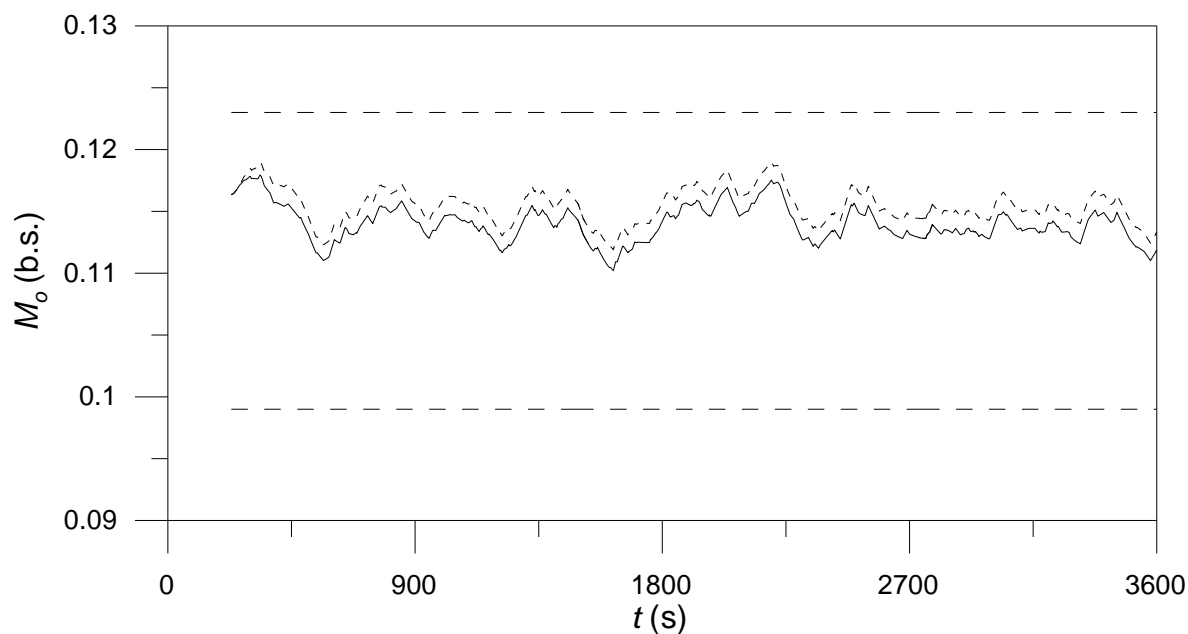


Figura 4.34. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.33. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.

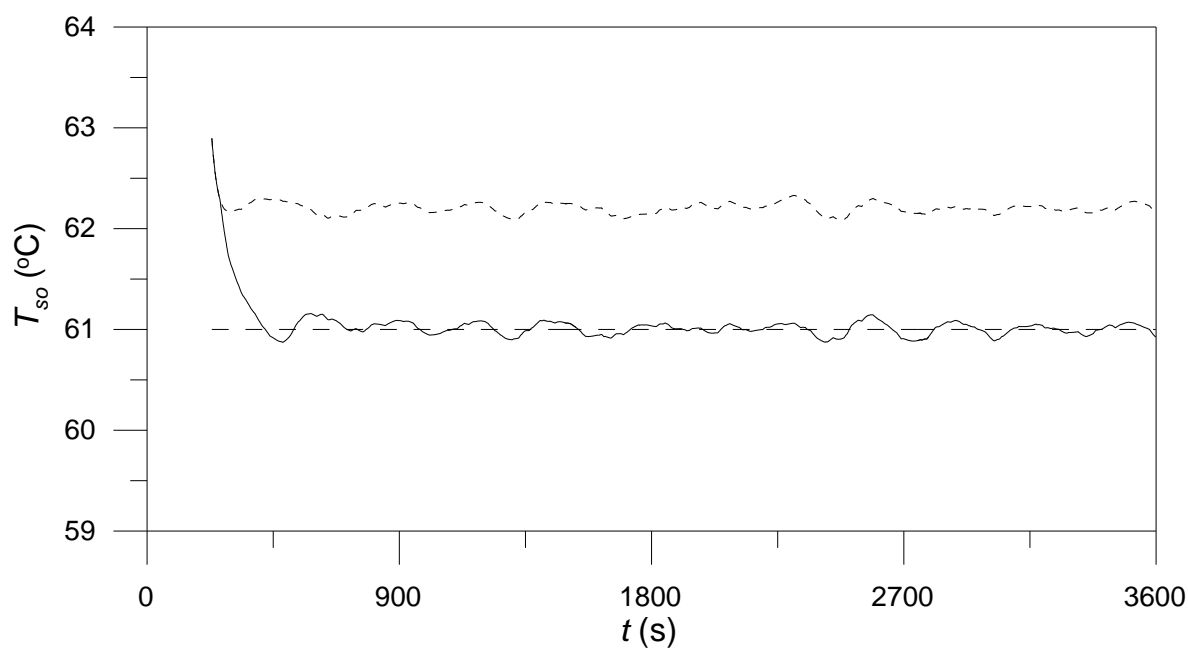


Figura 4.35. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.33. Linha com traços longos: *set-point*.

Os resultados dos cálculos em malha fechada reportados nas Figuras 4.24 a 4.35 foram obtidos assumindo um ganho proporcional igual a $0,01 \text{ m s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e constantes integral e derivativa iguais a 8,4 e 11,2 s, respectivamente. Além disso, como pode ser observado de forma aproximada nas Figuras 4.24, 4.27, 4.30 e 4.33, a velocidade da esteira foi inicialmente fixada em $0,0626 \text{ m s}^{-1}$, ou seja, adotou-se uma velocidade idêntica a atualmente utilizada na indústria investigada, o que equivale a um tempo de residência inicial do produto de 230 s. De fato, uma rápida análise das Figuras 4.24, 4.27, 4.30 e 4.33 evidencia que a ação de controle somente ocorreu a partir do momento em que o material começou a ser detectado na extremidade de descarga da esteira, visto que na condição inicial o secador-resfriador encontrava-se sem carga. Neste instante, observa-se que o controlador imediatamente reduziu a velocidade da esteira, a fim de aumentar o tempo de residência e por conseqüência reduzir a temperatura do sólido, a qual encontrava-se aproximadamente $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ acima do *set-point*. Em seguida a ação de controle foi proporcional as diferenças entre a temperatura desejada e a calculada frente as perturbações impostas ao processo.

De modo geral, observa-se um controle que atende as necessidades de umidade e temperatura do leito na saída do secador-resfriador, as quais haviam sido inicialmente especificadas na secção 3.3, quando da definição do *set-point*. Entretanto, uma discrepância é notada entre o comportamento dinâmico real (ver Figuras 4.18 e 4.19) e os resultados obtidos em malha aberta no equipamento virtual, principalmente se considerados os valores de umidade e temperatura do sólido frente a perturbações na temperatura do ar de secagem. Este comportamento é de fato atribuído ao incremento dos limites aceitos para as perturbações, os quais excederam em muito os valores observados experimentalmente, como detalhadamente explicado na secção 3.3.

Em função do aspecto acima citado, novas simulações foram realizadas considerando variações simultâneas e dentro dos limites observados experimentalmente para as variáveis M_i (0,142 a 0,156 b.s.), T_{si} (103,2 a 109,8 $^{\circ}\text{C}$), T_g (52,6 a 53,4 $^{\circ}\text{C}$) e U (0,0663 a 0,0703 kg kg^{-1}). As Figuras 4.36 a 4.38 apresentam o comportamento dinâmico do leito de soja extrusada na descarga do

secador-resfriador quando o mesmo é submetido a estas variações transientes nas condições de operação.

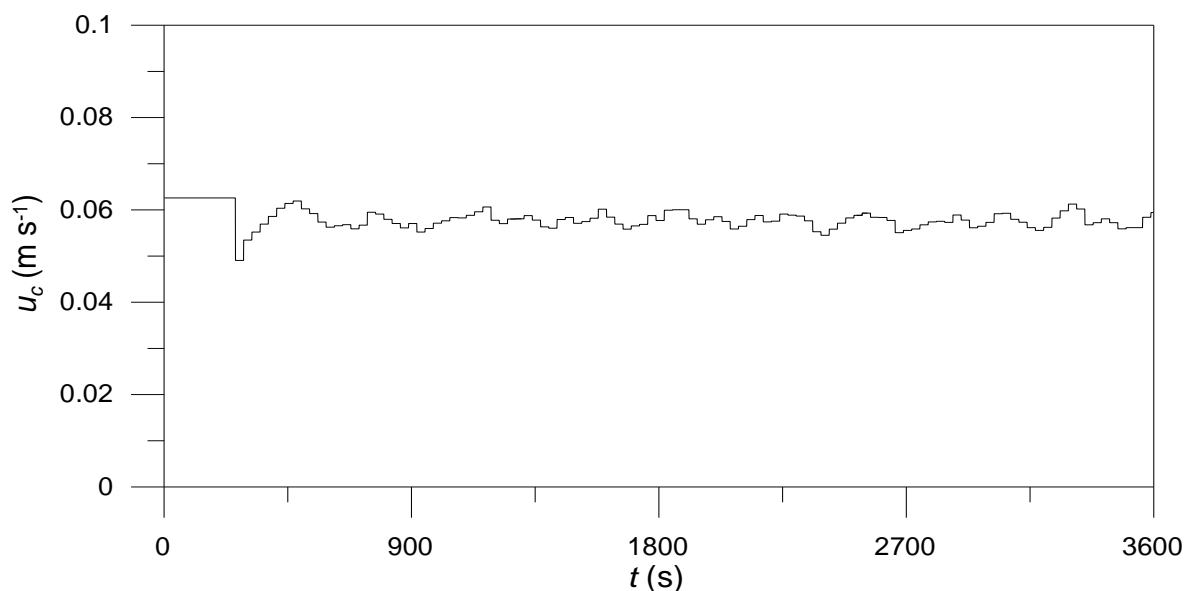


Figura 4.36. Velocidade da esteira em malha fechada considerando atuações do controlador com passo 30 s e perturbações simultâneas em M_i (0,142 a 0,156 b.s.), T_{si} (103,2 a 109,8 °C), T_g (52,6 a 53,4 °C) e U (0,0663 a 0,0703 kg kg^{-1}).

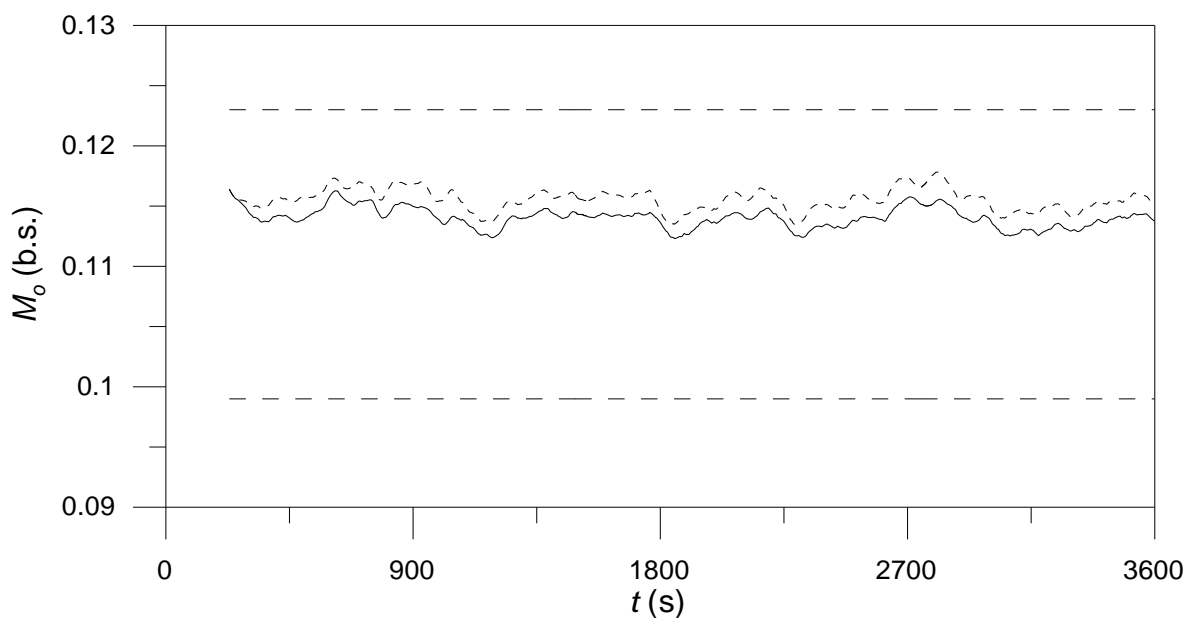


Figura 4.37. Umidade de descarga do leito em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições reportadas na Figura 4.36. Linhas com traços longos: variação máxima permitida para a variável considerada.

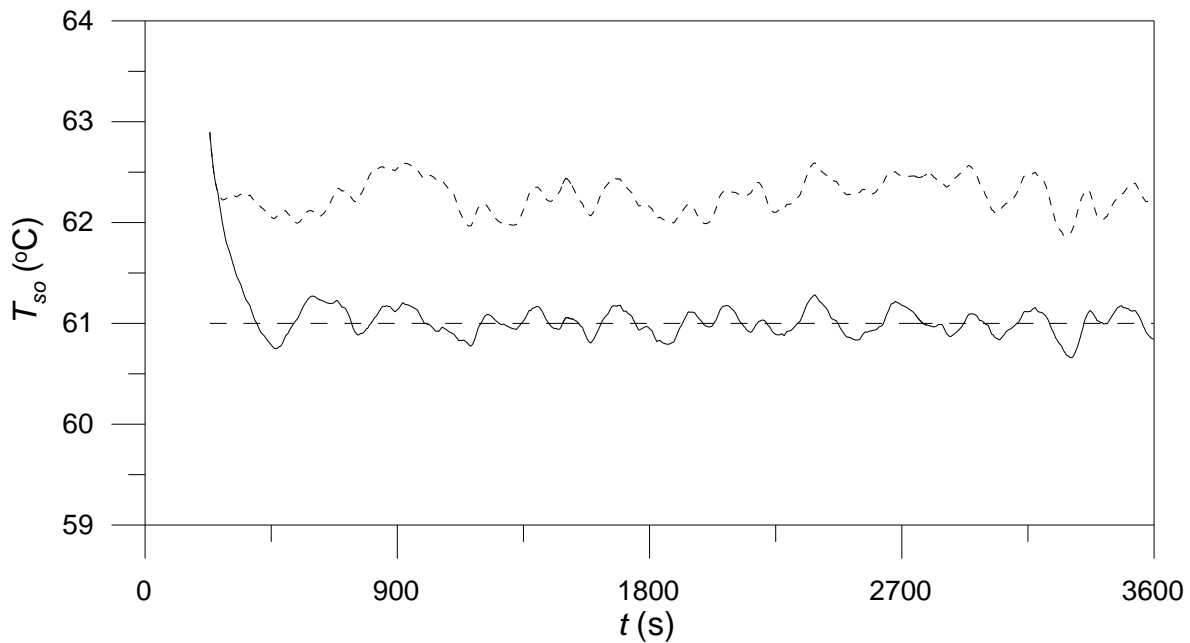


Figura 4.38. Temperatura do leito na descarga do secador-resfriador em malha aberta (linha com traços curtos) e fechada (linha sólida) nas mesmas condições especificadas na Figura 4.36. Linha com traços longos: *set-point*.

Antes de tudo, cabe mencionar que as perturbações responsáveis pelas oscilações nas Figuras 4.36 a 4.38 no intervalo de operação de 3600 s não são demonstradas por que são idênticas as reportadas nas Figuras 4.20 a 4.23, visto que sementes iguais foram utilizadas na geração dos números aleatórios, porém reduzidas de um fator aproximadamente igual a 2,3 para M_i , 2,6 para T_{si} , 13,3 para T_g e 3,4 para U .

Da Figura 4.38 observa-se que a temperatura do leito na saída do secador em malha fechada mantém-se em $61,0 \pm 0,5$ °C, enquanto que em malha aberta os valores estão muito próximos ao limite superior aceitável para esta variável (62,5 °C). A importância da estratégia de controle também é revelada na Figura 4.37, onde como causa do *set-point* adotado para a temperatura observam-se valores de umidade do leito relativamente mais próximos do ideal (0,111 b.s) em malha fechada do que na ausência do controle automático.

5. CONCLUSÕES

Experimentos de secagem e resfriamento de soja extrusada foram realizados no intervalo de temperatura de 30 a 50 °C em equipamento batelada de laboratório. O objetivo principal dos ensaios foi obter perfis temporais de umidade e temperatura a fim de determinar os coeficientes de transporte de calor e massa característicos da operação industrial análoga. Os valores dos referidos parâmetros foram obtidos por ajuste às curvas experimentais resultantes por aplicação do método simplex de otimização e do modelo de secagem-resfriamento proposto com $\partial M / \partial x = 0$ e $\partial T_s / \partial x = 0$.

O modelo dinâmico sugerido para descrição do processo investigado é representado por duas equações diferenciais parciais, oriundas de balanços de massa para o soluto e de energia em um elemento infinitesimal de volume do leito de soja extrusada. O modelo reproduziu corretamente perfis transientes de umidade e temperatura na descarga de um secador-resfriador industrial de soja extrusada. Equações empíricas do tipo Arrhenius, obtidas para correlacionar as temperaturas do gás de secagem com as propriedades de transporte resultantes dos ensaios de laboratório, foram adotadas nas referidas simulações.

A confirmação da validade do modelo dinâmico permitiu a utilização do mesmo para propósitos de controle do secador-resfriado industrial. Neste sentido, o modelo foi empregado como equipamento virtual para verificar a eficiência de um controlador PID a fim de manter a temperatura de descarga do leito em $61,0 \pm 1,5$ °C. As simulações em malha aberta e fechada frente a perturbações tipicamente encontradas em condições reais de processamento de soja extrusada demonstraram que a consistência da estratégia de controle proposta, visto que a temperatura foi mantida no valor desejado sem que a umidade do sólido na mesma posição do equipamento ultrapassasse os limites previamente estabelecidos.

Os resultados obtidos indicam que a implantação do procedimento de controle efetivamente eliminaria a possibilidade de picos de pressão devido ao aumento excessivo da temperatura no extrator, o que significaria uma medida preventiva de importante impacto para diminuição do risco de explosão em plantas

de extração de óleo e proteína de soja com hexano. Com propósitos práticos similares, mas com foco em questões econômicas, o modelo e a estratégia de controle poderiam ser utilizados para otimização de etapas importantes do processo com impacto positivo principalmente na eficiência de extração dos referidos solutos.

O custo requerido para implantar o procedimento de controle automático investigado é desprezível visto que requer basicamente a aquisição de um variador de velocidade, um sensor de infravermelho *in-line* e um controlador PID, os quais são extensivamente comercializados por valores inexpressivos.

REFERÊNCIAS

ABITANTE, A. L. Modelagem dinâmica e análise de um sistema de controle de umidade de folhas de erva-mate em secadores contínuos de esteira. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2007.

ALAM, A., SHOVE, G. C. Simulation of soybean drying. Transactions of the ASAE, 16(1), 134-136, 1973.

AOCS. Official methods and recommended practices of the American oil chemist's society. 5th ed., *American Oil Chemist's Society*, Champaign, USA, 2004.

ASAE. Moisture Relationships of Plant-based Agricultural Products. ASAE D245.5 OCT95, 512-528, 1999.

AVIARA, N. A., AJIBOLA, O. O., ONI, S. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. International Biosystems Engineering, 87(2), 179-190, 2004.

AVIARA, N. A., EHIABHI, S. E., AJIBOLA, O. O., ONI, S. A., POWER, P. P. ABBAS, T., ONUH, O. A. Effects of moisture content and temperature on the specific heat of soya bean, Moringa oleifera seed and Mucuna flagellipes nut. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 4(1), 1-6, 2011.

BARROZO, M. A. S., SARTORI, D. J. M., FREIRE, J. T., ACHCAR, J. A. Discrimination of equilibrium moisture equations for soybean using nonlinearity measures. Drying Technology, 14(7&8), 1779-1794, 1996.

BARTON, A. D., LEWIN, P. L. Experimental comparison of the performance of different chain conveyor controllers. *Journal of Systems and Control Engineering*, 214, 361-369, 2000.

BERTRAND, J., LAURENT, C., LECLERCQ, V. O mundo da soja. *Hucitec*, São Paulo, Brasil, 1987.

BONIFÁCIO, W. P., BARROZO, M. A. S., SARTORI, D. J. M. Isotermas de umidade de equilíbrio para a soja. XXI Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 2, 443-453, Ouro Preto, Brasil, 1993.

BOSS, E. A. Análise do desempenho de plantas de extração de óleo convencionais e de processos supercríticos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2000.

BRUSEWITZ, G. H. Density of rewetted high moisture grains. *Transactions of the ASAE*, 18(5), 935-938, 1975.

CALÇADA, L. A., BISCAIA, J. E., MASSARANI, G. Modelagem e simulação de secadores em leito fixo. XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, 2, 384-395, Ouro Preto, Brasil, 1993.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Safra 2010/2011. Quarto Levantamento, *Companhia Nacional de Abastecimento*, Brasil, 2011.

CUSTÓDIO, A. F. Modelagem e simulação do processo de separação de óleo de soja-hexano por evaporação. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2003.

DESHPANDE, S. D., BAL, S. Specific heat of soybean. *Journal of Food Process Engineering*, 22, 469-477, 1999.

EMBRAPA. Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil - 2004. *Sistemas de Produção*, N° 1, *Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias*, Brasil, 2004. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>. Último acesso em 20 de fevereiro de 2012.

HUBNER, O. Análise da conjuntura Agropecuária. Safra 2010/2011 – Soja. Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado do Paraná, Brasil, 2010.

HOLMAN, J. P. Heat Transfer. *McGraw-Hill Inc.*, New York, USA, 1983.

HUTCHINSON, D., OTTEN, L. Thin layer drying of soybeans and white beans. *ASAE/CSAE*, 82-104, 11-14, Vancouver, Canada, 1982.

JENSEN, S. Modelagem e investigação experimental dos processos de secagem e extração de erva-mate (*Ilex paraguariensis*). Tese de Doutorado em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2011.

JENSEN, S., MELEIRO, L. A. C., ZANOELO, E. F. Soft-sensor model design for control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis*). *Biosystems Engineering*, 108, 75-85, 2011.

JENSON, V. G., JEFFREYS, V. G. Mathematical methods in chemical engineering 2nd ed., *Academic Press*, London, UK, 1977.

KIRANOUDIS, C. T., BAFAS, G. V., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D. MIMO Control of conveyor-belt drying chambers. *Drying Technology*, 13, 73-97, 1995.

KIRANOUDIS, C. T., MAROULIS, Z. B., MARINOSKOURIS, D. Dynamic simulation and control of conveyor-belt dryers. *Drying Technology*, 12, 1575-1603, 1994.

LIU, K. Soybeans: chemistry, technology, and utilization. *Chapman & Hall*, New York, USA, 1997.

MILLIGAN, E. D. Survey of current solvent equipment. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 53(6), 286-290, 1976.

NELSON, S. O., STETSON, L. E. 250 Hz to 12 GHz dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASAE*, 18(4), 714-714, 1975.

NUNES, A. S. Determinação das propriedades térmicas dos grãos de soja. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2000.

OSBORN, G. S., WHITE, G. M., SULAIMAN, A. H., WALTON, L. R. Predicting equilibrium moisture properties of soybeans. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 2109-2113, 1989.

PARAÍSO, P. R. Modelagem e análise do processo de obtenção do óleo de soja. Tese de Doutorado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2001.

PERKINS, E. G. Composition of soybeans and soybean products. In *Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization*, ERICKSON, D. R. (Ed.), 9-28, AOCS Press, Champaign, USA, 1995.

PERSSON, J., WENNERHOLM, M., O'HALLORAN, S. Handbook for Kjeldahl digestion. A recent review of the classical method with improvements developed by FOSS. FOSS, Hilleroed, Denmark, 2008.

RODRIGUES, R. S. Caracterização de extratos de soja obtidos de grãos, farinha integral e isolado protéico visando a formulação e avaliação biológica (em coelhos) de bebida funcional à base de extrato de soja e polpa de pêssegos. Tese de Doutorado em Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2003.

SOARES, M. S. Processamento de óleo de soja utilizando ultrafiltração em miscela na etapa de degomagem e na obtenção de lecitina. Tese de Doutorado em Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.

SOUZA, A. M. F. I., BARROZO, M. A. S., SARTORI, D. J. M. Análise da influência da temperatura e da velocidade do ar na cinética de secagem de grãos. XXI Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 2, 454-465, Ouro Preto, Brasil, 1993.

STEPHANOPOULOS, G. Chemical process control: an introduction to theory and practices. *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, USA, 1984.

STETSON, L. E., NELSON, S. O. Audiofrequency dielectric properties of grain and seed. Transactions of the ASAE, 15(1), 180-184, 1972.

TEMPLE, S. J., VAN BOXTEL, A. J. B., VAN STRATEN, G. Control of fluid bed tea dryers: controller performance under varying operating conditions. Computers and Electronics in Agriculture, 29, 217-231, 2000.

USDA. Oilseeds: World markets and trade. Circular Series FOP 05-11, *Foreign Agricultural Service, United States Department of Agriculture, USA*, 2011.

VAN'T LAND, C. M. Industrial drying equipment. Selection and application. *Marcel Dekker*, New York, USA, 1991.

ZANOELO, E. F., ABITANTE, A., MELEIRO, L. A. Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves. *Journal of Food Engineering*, 84, 458-468, 2008.

ZANOELO, E. F., BENINCÁ, C., RIBEIRO, E. Thermophysical properties of mate leaves: experimental determination and theoretical effect of moisture content. *Journal of Food Process Engineering*, 34, 2124-2136, 2011.

ZANOELO, E. F., DI CELSO, G. M., KASKANTZIS, G. Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. *Biosystems Engineering*, 96(4), 487-494, 2007.

ZINK, F. J. Specific gravity and air space of grains and seeds. *Agricultural Engineering*, 16(11), 439-440, 21935.